



Accionamiento de un tubo disparador para crear ondas de choque

Vallejo-Palma, Braulio; González-Vallejo, Jesús Alberto; Mendioza-Clemente, Raziel Noel; Gutiérrez-García Karla; Dávila-Vilchis, Juana-Mariel*

Información del Artículo	Resumen
Recibido: 10-sep-2024 Aceptado: 18-dic-2024	
Palabras clave: Ondas de choque, No. Mach, Tubo disparador, Fluidos compresibles	El estudio de las ondas de choque es fundamental en el análisis de fenómenos físicos, particularmente en el diseño aerodinámico de cuerpos sólidos sometidos a velocidades superiores a las del sonido. Es por lo que este artículo presenta el diseño y fabricación de un tubo disparador capaz de crear ondas de choque que permite entender su comportamiento en flujos supersónicos. La metodología se dividió en 4 etapas principales: 1) Análisis matemático para generar la onda de choque, 2) Modelado en CAD (Computer Aided Design) del sistema de disparo, 3) Fabricación y 4) Pruebas del dispositivo para validar su funcionamiento. En la fase del análisis matemático se calcularon las dimensiones del disparador a fin de garantizar la generación de la onda de choque. En el Modelado se obtuvo el diseño computacional 3D del disparador. En la fabricación se seleccionaron los materiales para construir el disparador y se hizo el ensamble de todos los componentes. Finalmente, se realizaron las pruebas para generar las ondas de choque mediante la liberación controlada de aire con un compresor estacionario y utilizando dos tipos de membranas: plástico y TPU (termopoliuretano). Los resultados obtenidos con ambos materiales demostraron que el disparador logró alcanzar flujos supersónicos para generar de las ondas de choque rectas.

1. Introducción

Durante siglos se han desarrollado diferentes armas de fuego con fines bélicos o de defensa, lo cuales son accionados por la presión generada de un propelente a alta velocidad que tienen como objetivo disparar uno o múltiples proyectiles [1]. Existe una variedad de estos dispositivos dependiendo el grado de daño deseado, alcance, o tamaño desde pistólas, rifles, fúsiles, ametralladoras o escopetas [2].

Otro tipo son los dispositivos explosivos improvisados (IED) por sus siglas en inglés, estos artefactos son contruidos manualmente y son accionados de diferentes maneras pero siguen el principio de funcionamiento de las armas de fuego [3]. Por lo que, para reducir los daños causados por los ya mencionados dispositivos, se han desarrollado mecanismos de protección o herramientas que prueba como tubos de choque. Este equipo de laboratorio simula las ondas expansivas de las explosiones sin utilizar explosivos reales, lo que maximiza la seguridad durante su uso [4]. De igual manera, durante la explosión se libera rapidamente energía que genera alta presión que viaja radialmente alrededor del tubo formando una capa delgada de aire con un espesor (m), llamada onda de choque [5].

El número de Mach, Ma es fundamental para el estudio de las ondas de choque en análisis aerodinámicos ya que ocurren en flujos compresibles que tienen valores de Ma mayores a 0.3 [6], como se describe a continuación.

- Subsónico $0.3 < Ma < 0.8$: los efectos de la densidad son despreciables y no presentan ondas de choque.
- Transónico $0.8 < Ma < 1.2$: región de frontera donde hay posibilidad de ondas de choque.
- Supersónico $1.2 < Ma < 3.0$: se presentan principalmente las ondas de choque y no hay región subsónica.
- Hipersónico $Ma > 3.0$: las ondas de choque y los cambios de flujo son significativos.

Las ondas de choque se forman cuando un objeto se acelera de una velocidad subsónica a una supersónica. Es decir, la velocidad del sonido de un fluido a , generalmente aire, es mayor que la velocidad de un objeto, V , relacionadas por Ma , como se muestra en la ecuación (1)[6].

$$Ma = \frac{V}{a} \quad (1)$$

Las ondas de choque se clasifican en dos tipos normales y oblicuas. Las normales se forma perpendicularmente al flujo del aire, mientras que las oblicuas se caracterizan por formar a un ángulo con respecto al fluido [8]. Una vez a la salida del objeto, las ondas presentan pérdidas de energía, sin embargo, en la onda de choque normal es mayor debido a que siempre se desacelera a una velocidad subsónica. Dentro de una sección cónica (difusor-tobera), a medida que la velocidad del objeto incrementa a velocidades supersónicas, la onda se va desplazando y forma una nueva onda de choque sucesivamente, lo que significa que la fuerza de arrastre aumente sobre el cuerpo sólido, por lo que se necesita mayor fuerza empuje para superarla [7].

Las ondas de choque se empezaron a estudiar durante la segunda guerra mundial, observando que las bombas dañaban únicamente de forma interna el objetivo [11]. Más adelante, en los años 50's se lograron generar ondas de choque por medio de fuentes electromagnéticas, lo que abrió diversas puertas para poder ser empleadas en técnicas médicas hasta el día de hoy, como la regeneración del tejido musculoesquelético, inflamación o fracturas mediante explosiones controladas que generan pulsos sónicos [9]. También, las ondas de choque se utilizan durante el diseño de aeronaves [10] o equipo balístico [12].

Por ejemplo, para el armamento corto o largo, están integrados por un cilindro metálico largo llamada cañón, que permite la propulsión del proyectil, entre más tiempo pasa dentro de éste, mayor es su aceleración radial y velocidad a la salida para alcanzar mayores distancias e incrementar la explosión [13]. Los tubos de choque funcionan bajo el mismo principio del cañón, está dividido en tres zonas: 1) recámara donde se almacena el cartucho,

2) cuerpo del tubo y 3) chooke que controla la distancia del proyectil como se muestra en la Figura [1]. Normalmente, durante las pruebas de los tubos de choque se utilizan cámaras de alta velocidad para observar la trayectoria del proyectil [14] o simulaciones de fluidos computacionales (CFD) por sus siglas en inglés [15], para validar su funcionamiento.

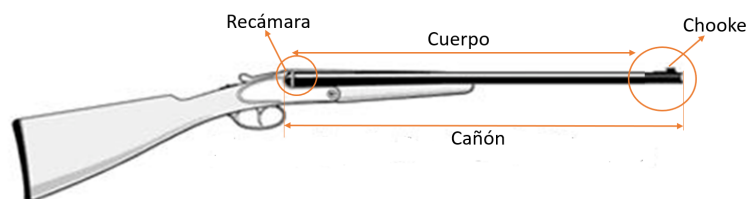


Figura 1: Partes del cañón de una escopeta.

Este artículo se centra en el diseño de un tubo de choque como (IED) que replica el funcionamiento de un arma cuando es accionada. Se incluye el modelado 3D y el cálculo del número de Mach dentro del tubo para generar las ondas de choque con base en sus dimensiones. Además, de la fabricación y ensamble de los componentes. Finalmente, se reportan los resultados obtenidos durante el accionamiento del tubo disparador y resaltan las posibles mejoras del modelo físico experimental como una aplicación didáctica de la Mecánica de Fluidos.

2. Metodología

El funcionamiento de un tubo disparador consiste en generar una diferencia de presiones, separadas por un diafragma de ruptura para poder generar ondas de choque, una vez que la capa se rompe, la onda se propaga en radialmente [16]. Para lograr este objetivo, el tubo es seccionado en tres zonas: 1) *Zona del disparador* se encarga de almacenar el aire a una presión definida. 2) *Zona de transición* está separada por una membrana delgada de tela de la zona del disparador, que cuando se rompe genera una onda de choque, debido a una diferencia de presiones P , velocidades V , temperaturas T , respectivamente y número de Ma a la entrada mayor que a su salida. 3) *Zona de pruebas* es la región donde la onda impacta al objetivo [4]. Algunos diseños incluyen un tanque de disipación que sirve para absorber la energía a la salida y disminuir la presión y velocidad del fluido [17].

Para este estudio se baso en el método de ruptura de membrana que se caracteriza por tener una capa delgada que impide el paso del aire para formar la onda de choque.

No. de Ma para generar la onda de choque

El número de Ma , así como su presión a la entrada y a la salida de la membrana, deben ser calculados para garantizar que el tubo disparador generará una onda de choque. Por lo tanto, para empezar con el diseño del disparador se propuso tubo de policloruro de

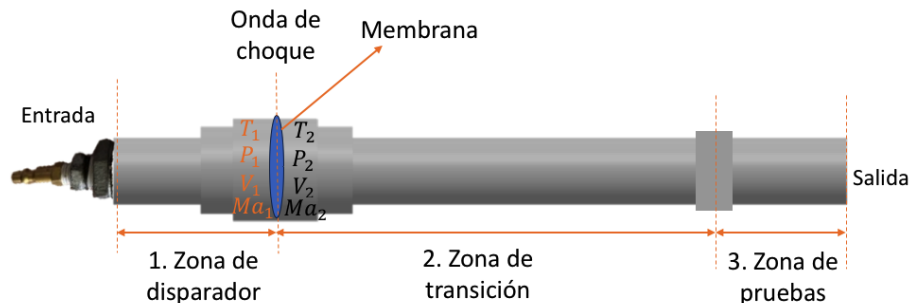


Figura 2: Zonas del tubo disparador.

Vinilo (PVC) con una longitud L (100 cm) y un diámetro, D de 1 in (2.54 cm). Autores en [4] recomiendan que la zona de transición deba ser al menos 2 veces la longitud de la zona de disparo, para este caso se tiene una relación $L/D = 39.37$. Para la membrana o diafragma se utilizó 200D TPU-nylon (thermopoliuretano) de 2mm de espesor.

Después de seccionar cada región, se relacionaron las áreas donde ocurre la onda de choque a la entrada An_1 con la de acoplamiento o garganta A^* , mediante la expresión:

$$\frac{An_1}{A^*} \quad (2)$$

Donde a partir de las tablas para flujos compresibles se calculó Ma_{n1} , con un flujo supersónico de 2.94 para garantizar la onda de choque. De igual manera, con este valor se relacionó la presión del depósito P_o de 80 psi para encontrar la presión antes de la onda de choque P_{n1} . Una vez determinado Ma_{n1} , se utilizaron las tablas de ondas de choque [18] para encontrar el Ma_{n2} a la salida de la membrana, donde se obtuvo un valor de 0.478, el cual demuestra la desaceleración a flujo subsónico. Finalmente, se relacionó Ma_{n2} con la presión atmosférica P_{atm} a la salida del tubo, para encontrar la presión después de la onda de choque. Dichos valores, se muestran en la Figura 3 del modelo 2D del sistema con todos sus componentes y dimensiones, donde el tubo es alimentado por un compresor mediante un conector de 1/4 in.

En la zona de acoplamiento se montó una válvula reguladora y un conector para restringir el flujo del aire en un solo sentido y controlar el caudal para evitar golpes de ariete.

Fabricación del tubo disparador

El tubo de choque consta de un tubo de PVC como componente principal, el cual está integrado de otros componentes dependiendo de cada sección para crear la onda de choque. Durante dicho proceso, no se requirió de maquinaria sofisticada, únicamente herramienta de presión para apretar los coples con el tubo. En la zona de disparo se utilizó un sistema de acoplamiento para conectar el tubo y el compresor para el suministro de aire. Y en la zona de transición se montaron unos coples para contener y sujetar a la me-

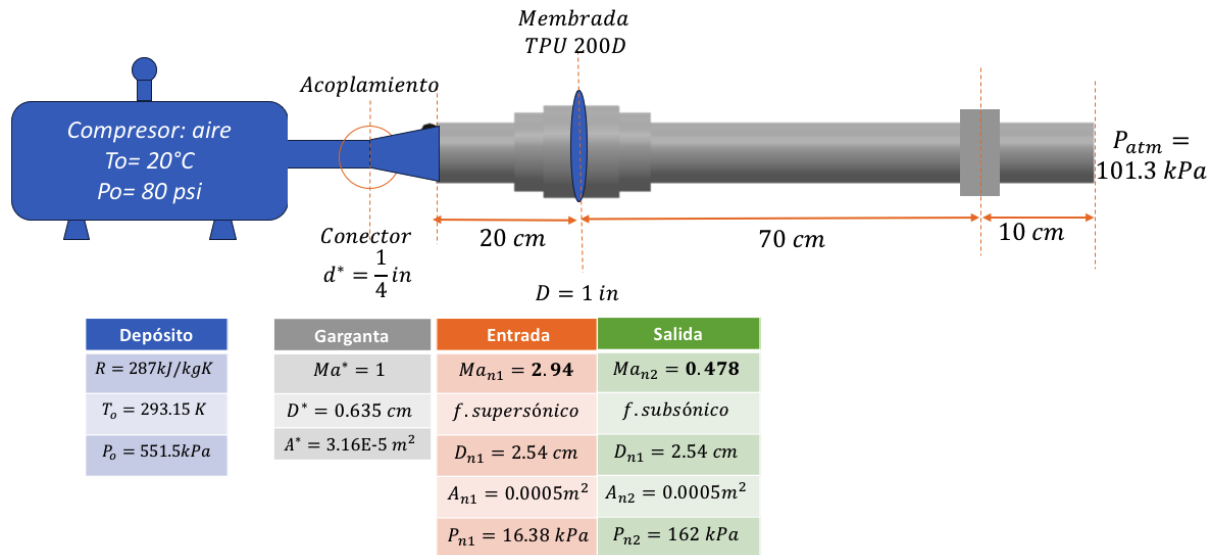


Figura 3: Vista lateral del tubo disparador con cada región acotada.

brana. A continuación se enlistan y describen cada uno de los pasos realizados y se ilustra su ensamble final en la Figura 4.

1. Macho de 1/4": permite la conexión de la boquilla del compresor a la alimentación del tubo.
2. Enroscada 1/4": permite la conexión del macho al reductor.
3. Reductor de 1/2.ª 1/4": para conectar la enroscada y un conector macho.
4. Macho cople de 1.ª 1/2": permite la conexión entre todos los elementos mencionados con el tubo PVC de 1".
5. Válvula de globo de PVC: ayuda a regular el flujo de aire que se suministra a la zona de disparo.
6. Válvula de Check: se utilizó para direccionar el flujo en un solo sentido y evitar contraflujos.
7. Cople de 1": sirve para unir las zonas de disparo y la de transición y contener a las membranas.
8. Conector macho 1": se coloca nuevamente al final del tubo para unirse a la válvula de expulsión de aire.
9. Válvula de expulsión de aire: para evitar su retención de aire, o golpes de airete, producido por un aumento repentino de presión por el cambio en la velocidad del caudal, su funcionamiento es similar al escape de un automóvil.

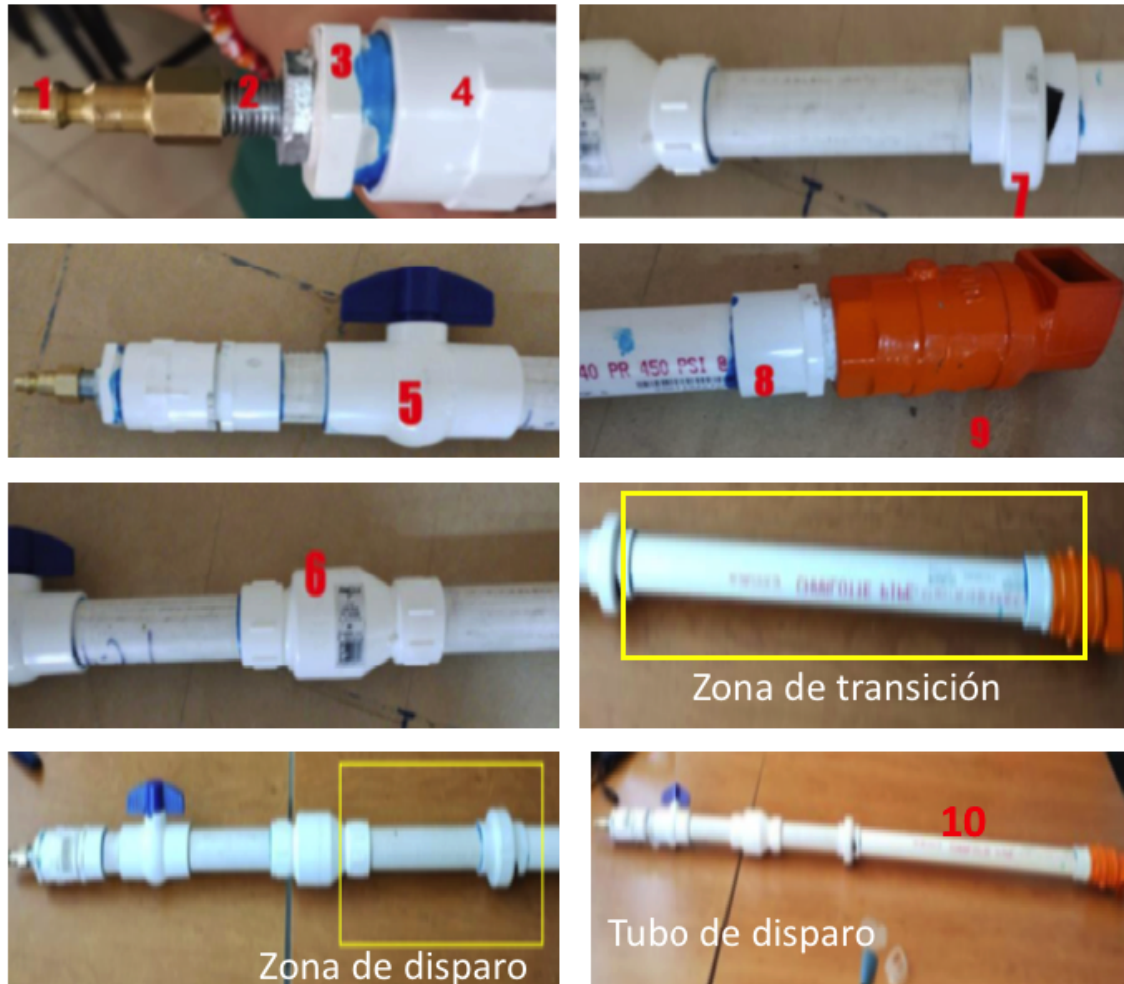


Figura 4: Ensamble del tubo disparador y sus componentes.

10. Tubo de disparador de PVC cédula 40 de 1".

Además, se utilizó cinta de Teflón, pegamento PVC para la unión de sus componentes, así como empaques de goma con el propósito de reducir posibles pérdidas de presión entre ambas partes. El diseño del cople fue propuesto para lograr un montaje y desmontaje rápido de la membrana, facilitando las pruebas repetitivas sin comprometer la funcionalidad del sistema.

3. Resultados

Para evaluar el funcionamiento del tubo se empleó un compresor comercial para aumentar la sección de disparo, de modo que al ingresar se creará la diferencia de presión para generar ondas de choque capaces de impulsar el objeto. En este estudio se realizaron pruebas con 2 tipos de membranas: 1) plástico (tear offs) y 2) TPU 200D con un espesor de

200 μm . Para ambos casos se utilizó un área de 4 cm^2 , los tubos fueron accionados a partir de 80 psi $\approx$ 550 kPa donde el TPU alcanzó hasta las 110 psi sin romperse, mientras que la membrana de tear off se rompió desde los 80 psi, como se observa en la Figura 5 antes y después del disparo.

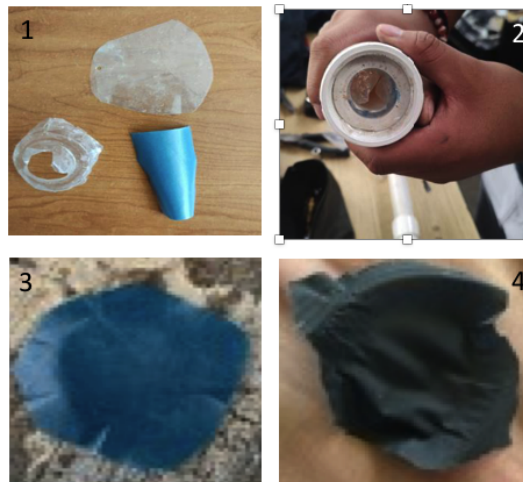


Figura 5: Membranas del tubo antes y después del disparo.

4. Discusión

Durante las pruebas de funcionamiento del tubo disparador se mostró que con la membrana de plástico se generó la onda de choque desde los 80 psi y se rompió completamente. Mientras, que la onda de choque con la membrana de TPU alcanzó hasta 110 psi, mostrando un desgaste progresivo tras cada prueba pero sin romperse, lo que significa que la fatiga del material afecta su desempeño en usos repetidos.

El diseño del cople permitió un montaje y desmontaje rápido de la membrana, facilitando las pruebas repetitivas sin comprometer la funcionalidad del sistema. A diferencia de otras propuestas, el uso de la válvula permitió controlar del flujo del aire a través del tubo y restringiéndolo en un solo sentido.

Durante las pruebas no se registraron pérdidas significativas de presión, gracias al uso de cinta de teflón en las uniones roscadas y al ajuste con pinzas. De igual manera, las dimensiones propuestas para el tubo, el uso del cople rápido de compresión, así como el par de empaques de goma ayudaron a preservar la presión obtenida en la zona de disparo. Permitiendo que la onda de choque fuera mayor y se minimizaran las pérdidas de presión entre ambas partes. Sin embargo, se detectaron pérdidas de presión en la zona de transición, lo que podría haber afectado la fuerza final del disparo.

El tubo disparador logró crear las ondas de choque y emular el funcionamiento de un arma de fuego. Visualmente, se observó un cambio brusco en la velocidad del aire

comprimido al cruzar la membrana, lo que sugiere que las ondas de choque se generaron conforme a lo esperado. Sin embargo, no se disponían de sensores para medir la velocidad exacta del aire, lo que limita la validación experimental de los cálculos de Mach. Por lo que se sugiere la implementación de instrumentos, sensores de presión, velocímetros de aire y cámaras de alta velocidad para registrar parámetros como la distancia alcanzada, la velocidad del aire comprimido durante el disparo, así como la salida del objeto, y el comportamiento de la onda de choque a lo largo de su trayectoria. Lo que podría proporcionar datos más detallados para evaluar el rendimiento y mejorar su diseño.

Las pruebas se realizaron a 80 y 110 psi, lo que restringió la evaluación de cómo diferentes niveles de presión afectan la velocidad de salida y la eficacia de las ondas de choque. Sin embargo, sería ideal realizar un rango de pruebas a presiones variables para estudiar estas relaciones. Por otro lado, la membrana funcionó como elemento de ruptura para la generación de ondas de choque, sin embargo, es importante evaluar su desgaste después de múltiples pruebas. Estudios adicionales podrían investigar materiales alternativos para mejorar su durabilidad o rendimiento bajo presiones más altas.

5. Conclusiones

El proyecto representa una aplicación didáctica de los principios de la dinámica de fluidos y de propulsión. A lo largo del desarrollo, se logró diseñar, calcular, y construir un sistema de disparo o tubo de choque, ya que aprovecha las ondas de choque para generar el impulso necesario para lanzar objetos, similar a una arma de fuego con los tres zonas principales: disparador, zona de transición, pruebas y de disipación. Tras la ruptura de la membrana se generó la onda de choque debido a la diferencia de presiones a la entrada y a la salida de la zona de pruebas y se expandió a través de la zona de transición.

También, se comprobó que el nivel de presión es un factor clave para alcanzar mayores alturas y generar la onda de choque en la membrana. La elección de materiales resistentes como el PVC, es crucial para soportar las altas presiones y fuerzas generadas en el disparo, lo que asegura la durabilidad y seguridad del sistema durante múltiples lanzamientos.

Se logró construir un sistema funcional capaz de generar ondas de choque y lanzar objetos mediante la ruptura de una membrana de plástico y TPU, este enfoque combina la ingeniería teórica y experimental. Lo que representa una combinación exitosa de diseño teórico, selección de materiales y aplicación práctica de principios de Mecánica de Fluidos.

Con mejoras en la precisión de las mediciones y la incorporación de tecnologías más avanzadas, el sistema podría adaptarse a investigaciones más complejas o aplicaciones específicas en la industria o la academia. Estas mejoras y reflexiones apuntan a continuar desarrollando el proyecto, asegurando que no solo cumpla con sus objetivos actuales, sino que también se convierta en una plataforma versátil para futuras aplicaciones experimentales.

Para recomendaciones futuras investigaciones se sugiere realizar pruebas con un rango más amplio de presiones para evaluar su impacto en la eficiencia del sistema. Incorporar simulaciones computacionales para optimizar el diseño antes de realizar pruebas físicas. Así como, experimentar con materiales alternativos para la membrana de ruptura y las conexiones del sistema.

Direcciones de correo de los autores

VALLEJO-PALMA, BRAULIO: bvallejop465@alumno.uaemex.mx

GONZÁLEZ-VALLEJO, JESÚS ALBERTO: jgonzalezv037@alumno.uaemex.mx

MENDIOZA-CLEMENTE, RAZIEL NOEL: rmendozac185@alumno.uaemex.mx

GUTIÉRREZ-GARCÍA KARLA: kgutierrezg418@alumno.uaemex.mx

DÁVILA-VILCHIS, JUANA-MARIEL*: mdavilav@uaemex.mx

Referencias

- [1] De Celis, M. A. L. (2019). *La historia de las armas de fuego*. Clío: Revista de historia. (210), 72-77.
- [2] Pineda Ríos, D. (2021). *Edad de la pólvora. Las armas de fuego en la historia del mundo*. México y la cuenca del pacífico. 10(29), 193-198.
- [3] Kopp, C. (2008). *Technology of improvised explosive devices*. *Defence Today*, 46-49.
- [4] Arias Vanegas, M. A. (2017). *Diseño y construcción de un tubo de choque*.
- [5] Troya Morales, I. (2022). *Diseño e impresión 3D de un dispositivo físico para simulación de disparo con arma de fuego*.
- [6] Mott, R. L. (1996). *Mecánica de fluidos aplicada*. Pearson Educación.
- [7] Tolentino-Masgo, S. L. B., Parco, M. A., Caraballo, S., Lacruz, L., Marcano, V., Ferreira, J., & Mírez, J. (2021). *Análisis numérico del comportamiento del flujo en la sección de la garganta de una tobera cónica experimental*. *Enfoque UTE*, 12(1), 12-28.
- [8] Hickel, S., Diegelmann, F., & Tritschler, V. (2015). *Mach Number Effects on Ignition and Mixing Processes in a Reacting Shock-Bubble Interaction*. In APS Division of Fluid Dynamics Meeting Abstracts (pp. G40-001).
- [9] Moya, D. (2002). *Terapia por onda de choque extracorpórea para el tratamiento de las lesiones musculoesqueléticas*. *Rev Asoc Argent Ortop Traumatol*, 67(4), 273-86.
- [10] Favorskaya, A. V. (2020). *Fall of shock wave from a supersonic aircraft into the media*. *Procedia Computer Science*, 176, 2546-2555.
- [11] Krehl, P. O. (2008). *History of shock waves, explosions and impact: a chronological and biographical reference*. Springer Science & Business Media.

- [12] Lo, K. W., and Ferguson, B. G. (2008). *A ballistic model-based method for ranging direct fire weapons using the acoustic muzzle blast and shock wave*. In 2008 International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. IEEE.(pp. 453-458).
- [13] Settles, G. S. (2006). *Toma ultrarrápida de imágenes de ondas de choque, explosiones y disparos*. Investigación y ciencia, 75.
- [14] Ligrani, P. M., McNabb, E. S., Collopy, H., Anderson, M., & Marko, S. M. (2020). *Recent investigations of shock wave effects and interactions*. Advances in Aerodynamics, 2(1), 4.
- [15] Kanamori, M., & Suzuki, K. (2011). *Shock wave detection based on the theory of characteristics for CFD results*. In 20th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference (p. 3681).
- [16] Guevara Sotelo, N. S. (2019). *Diseño de un Equipo de Generación de Ondas de Choque*.
- [17] Palencia Calderón, N. (2019). *Instrumentación de un equipo de generación de ondas de choque*.
- [18] White, F. M., & Xue, H. (2003). *Fluid mechanics*. (Vol. 3). New York: McGraw-hill.