

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Diseño de una pistola de aire comprimido para dardos anestésicos

**Kateryn Andrea León De la Torre
Jean Paul Trujillo Chamorro
Juan Andrés Suárez Guamán**

Ingeniería Mecánica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 18 de mayo de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

Diseño de una pistola de aire comprimido para dardos anestésicos

Kateryn Andrea León De la Torre

Jean Paul Trujillo Chamorro

Juan Andrés Suárez Guamán

Nombre del profesor, Título académico

Patricio Chiriboga, PhD.

Quito, 18 de mayo de 2020

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certificamos que hemos leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estamos de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizamos a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Kateryn Andrea León De la Torre

Código: 00130397

Cédula de identidad: 1753833068

Nombres y apellidos: Jean Paul Trujillo Chamorro

Código: 00134223

Cédula de Identidad: 1721931309

Nombres y apellido: Juan Andrés Suárez Guamán

Código: 00131965

Cédula de Identidad: 1718978545

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

Este trabajo tiene como objetivo presentar una solución para el departamento de Medicina Veterinaria de la Universidad San Francisco de Quito que trabaja con animales silvestres, quienes al momento utilizan una cerbatana para disparar dardos anestésicos. Utilizar este equipo pone en riesgo al usuario debido a que el alcance del proyectil es corto, por lo que este debe disminuir la distancia entre el animal y él. De acuerdo con este problema, se plantean tres distintas soluciones para resolverlo, las cuales aplican criterios ingenieriles que permiten diseñar un producto útil y seguro. Estas soluciones están basadas en los requerimientos solicitados por el cliente. Entre ellos se encuentra la adaptación de un manómetro para medir la presión de disparo que permitirá que la trayectoria balística sea variable y precisa. Además, se utilizan factores de diseño basados en distintas normas para garantizar su seguridad. Por otro lado, se realizaron los modelos analíticos necesarios para garantizar la funcionalidad del equipo, estos involucran un análisis mecánico, un análisis de la dinámica de fluidos, de la balística interna, balística externa y balística terminal del dardo. Así mismo, los cálculos ingenieriles se verifican con distintos modelos computacionales como es el análisis de esfuerzos y deformación. Entre los resultados obtenidos, se tiene que el factor de seguridad para el tanque de presión de 3 000 psi es de 3.62. Se obtuvo que el factor de seguridad a fatiga del resorte diseñado para el regulador de presión es de 2.27 para una carga máxima de 221 N. Además, para una distancia de disparo media definida de 15 m con una presión de 652 kPa, se obtiene que el módulo de la velocidad de impacto es 57.5 m/s. Se concluye que el diseño realizado es correcto y se plantean distintas maneras para mejorarlo a futuro, como es el diseño de distintos tamaños de cañones para poder manejar diferentes tamaños de dardos que permitirá obtener una eficiente relación de peso y velocidad.

Palabras clave: pistola, animal, dardo, seguridad, presión, anestesar

ABSTRACT

The objective of the present project is to find a reliable solution to the current problem of the Veterinary Medicine department. Specifically, the wild animal's team currently works with a blowgun to shoot darts. Using this device jeopardizes the life of the user due to its small scope. For this reason, three solutions are proposed to solve this problem. These solutions use different engineering criteria for designing a useful and safe device. Among the requirements, a gauge manometer needs to be installed to measure the shooting pressure, the trajectory of the dart needs to change, and it must be totally safe. Also, design safety factors based on several technical standards were used to guarantee a secure device. Likewise, different analytic models were made to guarantee the correct operation of the device, like mechanical analysis, fluid dynamics analysis, internal ballistic, external ballistic, and terminal ballistic. Furthermore, the calculations are verified with different computational simulations. Among the results obtained, the safety factor for the 3000 psi pressure vessel was 3.62. Likewise, the fatigue safety factor obtained for the designed spring was 2.27 for a maximum load of 221 N. Also, for a medium shooting distance of 15 m with a shooting pressure of 652 kPa, the impact velocity was 57.5 m/s. Finally, it is achieved the correct design of the dart gun, and there were proposed different ways to improve it. One of the future steps is to design different barrel sizes for working with different dart sizes.

Key words: gun, animal, dart, safety, pressure, anesthetize

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE TABLAS - ANEXOS.....	12
ÍNDICE DE FIGURAS.....	13
ÍNDICE DE FIGURAS – ANEXOS.....	14
1. INTRODUCCIÓN.....	15
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1. Requerimientos y especificaciones técnicas.....	18
2.2. Selección del prototipo.....	18
2.3. Plan de manufactura.....	19
2.3.1. Resorte para el regulador de presión.....	20
2.3.2. Cañón largo.....	21
2.3.3. Acople en T del manómetro.....	22
2.4. Detalle del diseño.....	23
3. MODELO ANALÍTICO.....	26
3.1. Suposiciones generales.....	26
3.2. Análisis de esfuerzos del tanque.....	28
3.2.1. Esfuerzo horizontal (Hoop Stress).....	28
3.2.2. Esfuerzo longitudinal (Longitudinal Stress).....	29
3.3. Balística interna.....	31
3.4. Balística externa.....	34
3.5. Balística terminal.....	38

3.6. Diseño del resorte	39
4. MODELO COMPUTACIONAL	45
4.1. Análisis de esfuerzos	45
4.1.1. Tanque de aire comprimido	45
4.1.2. Resorte	48
4.2. Análisis de la dinámica del fluido	51
4.2.1. Expansión interna del aire	52
4.2.2. Impulso del dardo.....	54
4.3. Análisis de la dinámica del dardo.....	60
4.3.1. Ecuaciones de movimiento	61
4.3.2. Resultados.....	62
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	63
5.1. Comparación entre el modelo analítico y computacional: tanque 3000 psi.....	63
5.2. Comparación entre el modelo analítico y computacional: resorte	64
5.3. Comparación entre el modelo analítico y computacional de la dinámica del fluido	65
5.4. Comparación entre el modelo analítico y computacional de la dinámica del dardo	66
5.5. Análisis de los resultados obtenidos en base a las necesidades del cliente.....	67
6. TRABAJO FUTURO	69
7. CONCLUSIONES.....	71
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
9. ANEXOS.....	76
9.1. ANEXO A: ESTÁNDARES INGENIERILES.....	76
9.2. ANEXO B: PLANOS DE MANUFACTURA	77
9.3. ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES.....	82

9.3.1.	Solución ecuación 3.6.....	82
9.3.2.	Solución de la ecuación 3.11.....	82
9.3.3.	Solución de la ecuación 3.12.....	82
9.3.4.	Solución de la ecuación 3.16.....	82
9.3.5.	Solución de la ecuación 3.17.....	83
9.3.6.	Solución de la ecuación 3.25.....	83
9.3.7.	Solución de la ecuación 3.26.....	83
9.3.8.	Solución de la ecuación 3.27.....	84
9.3.9.	Solución de la ecuación 3.28.....	84
9.3.10.	Solución de la ecuación 3.32.....	84
9.3.11.	Factor de seguridad del resorte (FATIGA).....	85
9.3.12.	Solución de la ecuación 4.2.....	85
9.4.	ANEXO D: DATOS INICIALES.....	88
9.4.1.	Datos iniciales para el análisis de esfuerzos en el tanque.....	88
9.4.2.	Datos iniciales para la balística interna.....	88
9.4.3.	Datos iniciales para la balística externa.....	89
9.4.4.	Datos iniciales para el diseño del resorte.....	89
9.5.	ANEXO E: MODELO COMPUTACIONAL DEL ANÁLISIS DE ESFUERZOS.....	90
9.5.1.	Datos iniciales para el análisis de esfuerzos del tanque.....	90
9.5.2.	Datos iniciales para el análisis de esfuerzos del resorte.....	91
9.5.3.	Tablas de impacto para tres distintas fuerzas calculadas.....	91
9.6.	ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DE FLUIDO.....	93
9.6.1.	Datos iniciales para la simulación de la expansión del aire.....	93
9.6.2.	Modelo utilizado para la expansión del aire.....	93
9.6.3.	Datos iniciales para la simulación del impulso del dardo.....	94
9.6.4.	Diseño 3D para la simulación del impulso del dardo.....	95

9.6.5.	Comportamiento del perfil de velocidad de un objeto en un fluido laminar	95
9.6.6.	Expansión del aire a presión para el escenario B.....	96
9.6.7.	Coefficiente de arrastre para un cilindro con flujo paralelo.....	97
9.7.	ANEXO G: MODELO COMPUTACIONAL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL DARDO.	98
9.7.1.	Datos iniciales para el código.....	98
9.7.2.	Datos calculados de la balística del dardo	98
9.7.3.	Datos asumidos de la balística del dardo.....	98
9.7.4.	Código de MATLAB.....	99
9.7.5.	Diferencia de altura para distintas posiciones de tiro. Masa 1	100
9.7.6.	Diferencia de altura para distintos ángulos de tiro. Masa 1.....	101
9.7.7.	Diferencia de altura para distintas posiciones de tiro. Masa 2	101
9.7.8.	Diferencia de altura para distintos ángulos de tiro. Masa 2.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de requerimientos y especificaciones técnicas.....	18
Tabla 2. Descripción del prototipo.....	19
Tabla 3: Cálculos de tiempo, velocidad y distancia descendida y a una determinada distancia recorrida x.	38
Tabla 4: Resultados de la simulación obtenidos a tres distintas fuerzas calculadas a una distancia de 20 metros	51
Tabla 5: Resultados de la simulación obtenidos a los datos iniciales propuestos	52
Tabla 6. Coordenadas Punto Final	58
Tabla 7. Número de Mach para el Punto Final	59
Tabla 8. Número de Reynolds	60
Tabla 9. suposiciones para la balística del dardo	61
Tabla 10. Factor de seguridad y valor del esfuerzo de Von Misses del tanque de aire comprimido para ambos modelos	63
Tabla 11. Factor de seguridad del resorte para ambos modelos	64
Tabla 12. Factor de seguridad a fatiga del resorte	65
Tabla 13. Resultados del modelo computacional 4.2.1	65
Tabla 14: Resultados del modelo computacional 4.2.2.	66
Tabla 15. Resultado de la balística externa para ambos modelos.....	66
Tabla 16: Comparación de los resultados obtenidos con las especificaciones técnicas	68

ÍNDICE DE TABLAS - ANEXOS

Tabla A - 1: Estándares y normas utilizadas para el diseño de la pistola para dardos anestésicos.....	76
Tabla G - 1: Datos iniciales utilizados en el código de MATLAB.....	98
Tabla G - 2: Datos calculados y constantes de la balística del dardo	98
Tabla G - 3: Datos asumidos para el impacto del dardo	98
Tabla G - 4: Velocidad de impacto, presión inicial y diferencia de altura para distintas posiciones de impacto de la masa 1.	100
Tabla G - 5: Diferencia de altura para distintos ángulos de tiro de la masa 1.	101
Tabla G - 6: Velocidad de impacto, presión inicial y diferencia de altura para distintas posiciones de impacto de la masa 2.	101
Tabla G - 7: Diferencia de altura para distintos ángulos de tiro de la masa 2.	102
Tabla E - 1: Resultados de la simulación obtenidos a tres distintas fuerzas calculadas a una distancia de 5 metros.	91
Tabla E - 2: Resultados de la simulación obtenidos a tres distintas fuerzas calculadas a una distancia de 10 metros.	92
Tabla E - 3: Resultados de la simulación obtenidos a tres distintas fuerzas calculadas a una distancia de 15 metros.	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de la pistola para dardos anestésicos.....	24
Figura 2. Diagrama del cuerpo libre del dardo dentro del cañón.....	26
Figura 3. Representación de las fuerzas horizontales dentro del tanque	28
Figura 4. Representación de las fuerzas longitudinales dentro del tanque.	29
Figura 5: Elemento infinitesimal en el tanque	30
Figura 6. Diagrama del cuerpo libre del dardo dentro del cañón.....	32
Figura 7. Diagrama dinámico del dardo en el ambiente.	34
Figura 8. Diagrama de fuerzas del dardo en la trayectoria horizontal.	36
Figura 9. Diagrama de fuerzas del resorte	39
Figura 10. Tanque 3000 psi.	46
Figura 11. Aplicación de cargas y propiedades mecánicas del material.....	46
Figura 12. Simulación, resultado factor de seguridad.....	47
Figura 13. Simulación, resultado Esfuerzo de Von Mises.....	48
Figura 14. Modelado del resorte.	48
Figura 15. Simulación, resultado factor de seguridad.....	49
Figura 16. Simulación, resultado Esfuerzo de Von Mises Fuente.	50
Figura 17. Simulación, desplazamiento del resorte	50
Figura 18. Variación de la presión dentro del mecanismo de la pistola.	53
Figura 19. Vectores de velocidad del flujo de aire que atraviesa por el sistema interno.	53
Figura 20. Velocidad del aire en la dirección x.	54
Figura 21. Secuencia de pasos para obtener la presión inicial.....	55
Figura 22. Gráficas de velocidad comparando los dos escenarios.....	56
Figura 23. Velocidad del Punto Final a lo largo de la simulación.	58

ÍNDICE DE FIGURAS – ANEXOS

Figura F - 1: a) Modelo CAD utilizado para la expansión del aire b) Volumen interno generado para el análisis CFD.....	93
Figura F - 2: a) Dardo CAD 3D b) Dimensiones del dardo.....	95
Figura F - 3: Movimiento de un elemento cilíndrico dentro de una tubería en un fluido completamente laminar	95
Figura F - 4: Presión estática para el escenario B	96
Figura F - 5: Coeficiente de arrastre para un cilindro con flujo paralelo al eje en función del número de Reynolds.....	97
Figura F - 6: Coeficiente de drag para un cilindro con flujo paralelo al eje en función del número de Reynolds.....	97

1. INTRODUCCIÓN

Una pistola de aire comprimido es un arma que usa la fuerza generada por el aire para poder disparar un proyectil. En veterinaria estas armas son utilizadas para disparar dardos anestésicos hacia animales que son difíciles de controlar, con la finalidad de realizar pruebas médicas o transportarlos de manera segura a otra ubicación. La selección de la pistola debe ser acorde a distintos parámetros tales como: el tipo de animal al que se va a disparar, la distancia de seguridad, alcance máximo, fuerza de impacto y entre otras necesidades especiales considerando las distintas pieles de los animales.

Por otro lado, un dardo anestésico puede variar en diámetro, dependiendo de la cantidad de tranquilizante que se desee inyectar, velocidad de salida y la fuerza de impacto en la piel del animal. Los componentes que conforman un dardo tranquilizante son: una aguja hipodérmica, una doble cámara y un estabilizador. La cámara delantera lleva el líquido tranquilizante y la trasera lleva aire comprimido, al impactar en un animal se desprende un sello de silicona ubicado en la aguja el cual permite que el líquido se inyecte en el animal. A pesar de que el proceso dura fracciones de segundos, es de suma importancia controlar variables como presión y velocidad para evitar lesiones en el animal.

En la USFQ existe un programa en el Hospital de Medicina Veterinaria que trabaja con animales silvestres; sin embargo, no cuentan con el equipo adecuado para disparar los dardos tranquilizantes a una distancia segura, de tal manera que el veterinario no tenga que acercarse a animales peligrosos. Por el momento utilizan una cerbatana hecha de tubería PVC modificada para poder realizar los disparos; esta, además de ser imprecisa, permite como máximo disparar a una distancia de 10 m. Por lo tanto, este proyecto requiere diseñar o adaptar una pistola que trabaje con aire comprimido capaz de disparar dardos de hasta 6 ml de tranquilizante, con cañón intercambiable para aumentar o disminuir la distancia de disparo dependiendo del caso a tratar

-la cual varía desde 5 m a 20 m- y tomando en cuenta la precisión del arma anestésica dado que en ciertos animales solo se puede disparar en zonas específicas. Debido a las altas presiones de trabajo se debe asegurar que el equipo opere bajo las especificaciones técnicas internacionales para armas de aire comprimido.

Para el diseño del equipo es importante mencionar que se necesitan conocimientos de dinámica, termodinámica y mecánica de fluidos. En este caso, para predecir la velocidad de salida del proyectil se debe conocer el comportamiento del aire a lo largo de todo el mecanismo, de esta manera se puede obtener un modelo que permita relacionar datos como presión, masa, volumen y longitud para calcular la velocidad del hocico. Además, es importante conocer la trayectoria del proyectil y el punto de impacto. En cuanto a los análisis computacionales se utilizan programas especializados en este tipo de problemas. Para comprobar la resistencia de los materiales se utiliza Autodesk Fusion 360 y Autodesk Inventor, que a partir del método de los elementos finitos analizan el comportamiento de cada parte con las condiciones especificadas. Además, se utiliza Autodesk CFD para conocer la presión exacta a la que el aire entra en contacto con el proyectil. Este software permite analizar el comportamiento de los fluidos utilizando distintas condiciones, como presión, velocidad o caudal. Por último, para el análisis dinámico se utiliza MATLAB, este programa permite dibujar la trayectoria del proyectil y obtener el punto exacto de choque a una distancia deseada mediante el uso de las ecuaciones de movimiento.

Este tema abarca un amplio estudio tanto por la parte mecánica del arma como por la parte médica para la administración correcta de la droga adormecedora. El estudio de este tipo de artefactos es muy importante por muchas razones, una de ellas es que actualmente existen medicamentos que pueden ser administrados por vías respiratorias, es decir, por gas, cámaras de aire o intubación; pero hay otros que deben ser suministrados solo intercutáneamente. Décadas atrás, solo existía la cerbatana para anesteciar animales a cortas distancias.

Posteriormente, se inventó un rifle de pólvora capaz de disparar dardos, pero el uso de este equipo ocasionaba lesiones en el animal o incluso la muerte debido a la fuerza del impacto. Con el avance tecnológico, actualmente se tiene rifles de aire comprimido o CO₂ que son silenciosos y efectivos al momento de disparar (Jessup, 2006).

En el mismo contexto, existen lugares de protección de fauna silvestre en donde disparan chips de seguimiento, capaces de permanecer encendidos durante meses, para rastreo de los animales. (Méndez, 2013). Este sistema es muy útil en el cuidado animal en reservas ecológicas y bosques en donde antes se utilizaba bastante personal, como guarda bosques, para cuidar este tipo de ambientes. Actualmente, esto se realiza mediante el uso drones que permite cuidar de los animales a larga distancia sin tener contacto con estos (Verschoor, 2016). Otro uso radica en el acceso mediante cámaras en los drones a la vida de algunos animales para investigaciones ecológicas. Por estas razones, es importante destacar el desarrollo de los avances tecnológicos en este campo y asegurarse de estar a la vanguardia de la medicina veterinaria. Básandose en estas ideas, se procede a realizar la metodología adecuada para llegar al diseño óptimo.

2. METODOLOGÍA

2.1. Requerimientos y especificaciones técnicas

En la Tabla 1 se observa todos los requerimientos identificados, a partir de estos se obtienen las especificaciones técnicas que son empleados en el diseño del equipo.

Tabla 1. Lista de requerimientos y especificaciones técnicas

LISTA DE REQUERIMIENTOS	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS
Sea precisa	El rango máximo de error sea de $\pm 5\text{cm}$.
Control de presión (carga y descarga)	Se pueda trabajar con mínimo de 28 psi hasta con un máximo de 121 psi .
Se pueda medir la presión	La pistola-rifle tenga un manómetro que mida hasta 300 psi .
La trayectoria balística sea variable	EL rango de distancia sea desde 5 m hasta 20 m .
El contenedor de carga sea por atrás	Sistema de carga posterior.
Sea segura	El factor de seguridad entre la cantidad máxima que aguanta de presión y la que se tenga sea de 3.5. (ASME)

Las especificaciones técnicas permiten entender los requerimientos de una manera medible que podrán ser corroboradas con los modelos analíticos y computacionales. A partir de las especificaciones técnicas enlistadas en la Tabla 1, se procede a realizar la selección del prototipo.

2.2. Selección del prototipo

El sistema estará conformado por un tanque que almacene la presión necesaria para varios disparos, con un sistema de regulación de presión adaptado del original de la pistola de paintball Eclipse ETEK 4. Por otro lado, el sistema de recarga del dardo será por la parte posterior del arma para evitar riesgos al usuario. Es decir, se lo realizará por el canal del rastrillo

para poder acceder al cañón. Por último, se optará por modificar la pistola Eclipse ETEK 4 de tal manera que se reutilice su carcasa.

Tabla 2. Descripción del prototipo

Diseño del sistema de aire	Adaptación del sistema de aire de la pistola de paintball Eclipse ETEK 4
Método de recarga del dardo	Recarga posterior a través del conducto del rastrillo
Diseño del la carcasa de la pistola	Adaptar la pistola de paintball Eclipse ETEK 4 para que cumpla los objetivos planteados

Para poder adaptar la pistola de paintball Eclipse ETEK 4, existen distintos estándares y normas que se deben cumplir detallados en el ANEXO A: ESTÁNDARES INGENIERILES. Adicionalmente, para cumplir por completo con las especificaciones técnicas de la Tabla 1, se plantea el diseño y manufactura de 3 distintas partes que serán adaptadas al prototipo.

2.3.Plan de manufactura

Para construir la pistola anestésica, se parte de adaptar la pistola de paintball Eclipse ETEK 4. De esta, se utiliza toda su estructura: marco, mango, cañón, gatillo, adaptador de tanque de presión y regulador de presión. Sin embargo, para que cumpla con el objetivo de lanzar dardos anestésicos a distintas presiones, que pueden ser reguladas y medidas, se van a diseñar 3 piezas que serán adaptadas a la pistola. (ver ANEXO B: PLANOS DE MANUFACTURA).

2.3.1. *Resorte para el regulador de presión*

El diseño de un nuevo resorte para el regulador de presión fue calculado de tal manera que sea sensible al rango de presiones a utilizar.

- Proceso: El tipo de manufactura a utilizar para realizar esta pieza consta de varios pasos:
 - Enrollado en caliente: En esta parte la barra de acero alcanza temperaturas muy altas (depende del material, pero aproximadamente son 900°C) en donde puede obtener la forma espiral.
 - Templado: Este paso permite que se consolide y endurezca el material. El templado consiste en enfriar velozmente el resorte a temperaturas alrededor de los 60°C.
 - Revenido: El templado es un tratamiento térmico que endurece la pieza, pero deja puntos de quiebre internos en esta. Por eso, se realiza un revenido para que el acero se reforme internamente, elimine tensiones internas y obtenga la elasticidad clave que le permitirá cumplir la función de resorte.
 - *Shot Peening*: Este es un tipo de tratamiento superficial que ayuda a incrementar la vida útil del resorte al eliminar micro fisuras y darle mejor acabado.
 - Rectificado: Se procede a rectificar las puntas del resorte para darle calidad al producto.
 - Prensado: En este paso se comprime la pieza hasta que todas sus espiras se toquen, para asegurar que la elongación natural del resorte no cambie.
 - Medición y pintura: Se comprueba que las especificaciones del resorte estén correctas y si se desea se procede a pintar (esto ayuda a proteger contra el óxido).

- Diseño: El diseño de la pieza se tiene en el plano de taller entregado “Resorte regulador de presión”. (ver ANEXO B: PLANOS DE MANUFACTURA).
- Material: Se utiliza el Acero Inoxidable *ASTM A313*. Este tipo de acero es adecuado para resortes, como se lo explica en el libro de *Shigley's Mechanical Engineering Design*, Tabla 10.4.
- Especificación de condiciones de operación normal: El resorte trabaja a una presión de 121 PSI, que implica una fuerza vertical de 221 N.
- Compilación y pruebas: Se utiliza como base la norma *ASTM A401* y *ASTM A230*. (ver ANEXO A: ESTÁNDARES INGENIERILES).

2.3.2. Cañón largo

El diseño de esta parte se lo realiza con la finalidad de aumentar el largo del cañón a 60 cm que originalmente es de 40 cm.

- Proceso: El tipo de manufactura a utilizar para realizar esta pieza consta de varios pasos:
 - Torneado: Se utiliza para generar un tubo de diámetro externo de 23 mm y un diámetro interno de 20 mm.
 - Torneado para el roscado externo: Se lo realiza de igual manera con el torno.
 - Machuelado: Sirve para el roscado interno. De acuerdo con las especificaciones, se escoge el tipo de paso y se lo realiza.
- Diseño: El diseño de la pieza se tiene en el plano de taller entregado “Adaptador de cañón”. (ver ANEXO B: PLANOS DE MANUFACTURA).
- Material: Se utiliza el Acero Inoxidable *AISI 304*. Se escoge este material debido a que es posible mecanizar en los procesos seleccionados.
- Especificación de condiciones de operación normal: Esta pieza trabará de igual manera a 121 PSI.

- **Compilación y pruebas:** Se utiliza la norma de seguridad para equipos que funcionan a presión AD 2000. (ver ANEXO A: ESTÁNDARES INGENIERILES).

2.3.3. Acople en T del manómetro

El diseño de esta parte se lo realiza con la finalidad de poder adaptar un manómetro que mida la presión del reservorio secundario, que es la presión de disparo. El manómetro elegido tiene una conexión 1/8 NPT.

- **Proceso:** El tipo de manufactura a utilizar para realizar esta pieza consta de varios pasos:
 - **Torneado:** Se utiliza para hacer un tubo de diámetro externo 24 mm y 20 mm interno.
 - **Taladrado:** Permite perforar el cilindro en la posición en donde se coloca el otro tubo para el manómetro.
 - **Torneado:** Se realiza de igual manera el tubo del medio, con dimensiones de 13.3 mm de diámetro externo y 10.3 mm de diámetro interno.
 - **Soldadura:** Se sueldan las dos partes realizadas de modo que obtenga la forma de T.
 - **Torneado para el roscado externo:** Se lo realiza de igual manera con el torno.
 - **Machuelado:** Sirve para el roscado interno. De acuerdo con las especificaciones, se escoge el tipo de paso y se lo realiza.
- **Diseño:** El diseño de la pieza se tiene en el plano de taller entregado “Acople en T”. (ver ANEXO B: PLANOS DE MANUFACTURA).
- **Material:** Se utiliza el Acero Inoxidable AISI 304. Se escoge este material debido a que es posible mecanizar en los procesos seleccionados.

- Especificación de condiciones de operación normal: El resorte trabaja a una presión de 121 PSI, que implica verticalmente una fuerza de 221 N.
- Compilación y pruebas: Se utiliza la norma de seguridad para equipos que funcionan a presión AD 2000. Se puede utilizar también la SP-95 que es de sistemas normalizados de conexiones y uniones. (ver ANEXO A: ESTÁNDARES INGENIERLIES).

2.4. Detalle del diseño

La pistola Eclipse ETEK 4 es una pistola de paintball semiautomática. Esta involucra un sistema electrónico para controlar el sistema de disparo que reconoce la existencia del objeto, en este caso el dardo, con sensores infrarrojos para activar el disparo; si no reconoce la existencia de un proyectil, simplemente no se activa el mecanismo del disparo. Su diseño se basa en los rifles de aire comprimido el cual tiene dos reservas de aire. El primero es el tanque de aire comprimido, el cual almacena todo el volumen necesario para múltiples disparos, mientras que el segundo reservorio es interno en la pistola y este establece la presión de disparo. El regulador de presión posee un muelle helicoidal el cual se regula para obtener diferentes presiones de salida. Además, contará con un medidor de presión para que el usuario pueda calibrar la presión que directamente controla la velocidad de salida del proyectil. Este indicador será un manómetro de una presión máxima de 300 psi (2.1 MPa). Finalmente, este diseño también involucra un alargamiento del cañón para obtener un largo total de 60 cm. En la Figura 1 se muestra una vista lateral del diseño final con sus partes principales.

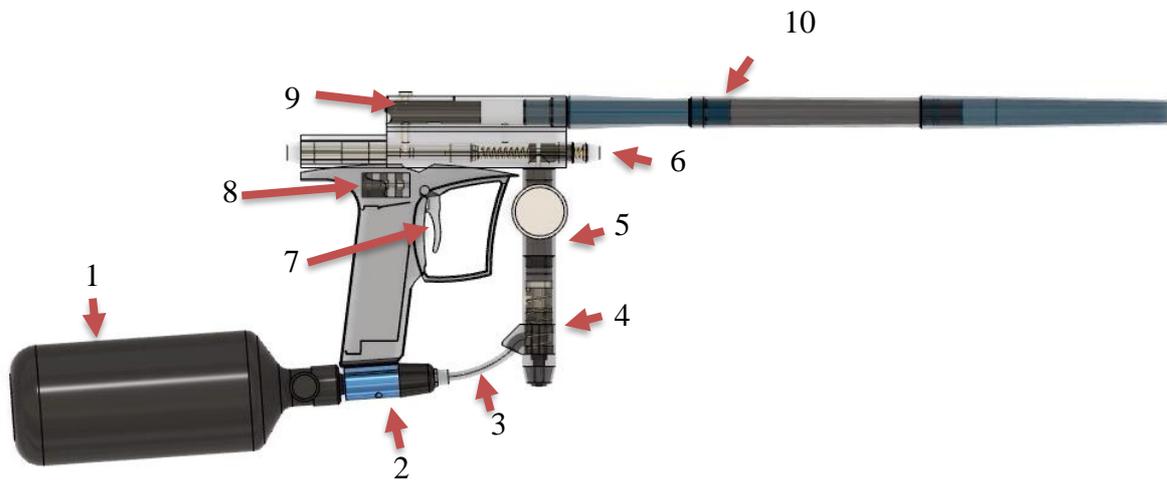


Figura 1. Sistema de la pistola para dardos anestésicos.

1. Tanque externo de presión 3000 psi.
2. Sistema de sellado.
3. Conexión entre el sistema de sellado con el regulador de presión.
4. Regulador de presión.
5. Acople entre el regulador de presión y la cámara secundaria que contiene el manómetro integrado.
6. Sistema de recarga del gatillo.
7. Gatillo.
8. Sistema de electroválvula.
9. Sistema del rastrillo.
10. Cañón

La segunda cámara puede ser regulada hasta una presión máxima de 121.4 Psi (0.837 MPa) y se pueden utilizar calibres de dardos hasta de 15 mm de diámetro.

A continuación, se muestran las propiedades de la pistola:

- Peso: 3.6 kg
- Longitud: 105 cm

- Cañón: 60cm
- Máxima presión primera cámara de presión: .3000 psi
- Máxima presión segunda cámara de presión: 121 psi
- Calibres: 12 mm, 13 mm, 15 mm.

3. MODELO ANALÍTICO

Para dimensionar el equipo es necesario realizar los análisis pertinentes. Debido a la complejidad del sistema es necesario llevar a cabo ciertas suposiciones que permiten simplificar el modelo, de esta manera es posible obtener valores aproximados que permitan predecir el comportamiento de la pistola en condiciones reales. Esta sección se ha dividido en 5 partes principales, de las cuales 3 corresponden al estudio balístico: estudio de la balística interna (impulso del proyectil dentro del cañón), balística externa (trayectoria y efectos externos en el proyectil), y balística terminal (fuerza y velocidad de impacto). Además, se lleva a cabo el análisis de esfuerzos en el tanque de almacenamiento y un dimensionamiento del restore (regulador de presión).

3.1. Suposiciones generales

La pistola posee un reservorio de aire secundario en donde se almacena el aire comprimido en la precarga. Cada vez que se presiona el gatillo, el aire comprimido almacenado se expande, empuja al dardo e inmediatamente se vuelve a cargar.

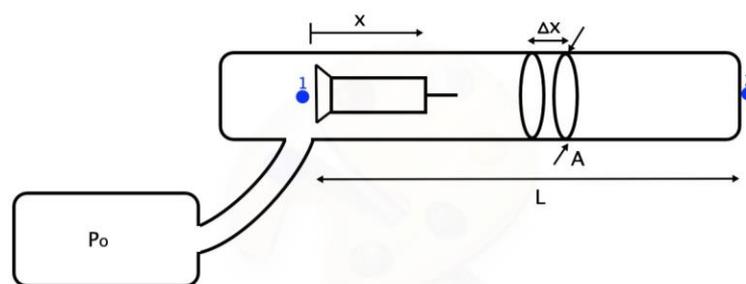


Figura 2. Diagrama del cuerpo libre del dardo dentro del cañón

A partir de la Figura 2, se puede observar el volumen de control estudiado en este análisis. Las suposiciones que implican este proceso son:

1. Se considera al aire como gas ideal
2. Las propiedades del aire en el depósito son constantes en todo instante de tiempo. Suposición de Estado Cuasiestático.
3. La velocidad del aire en el interior del reservorio es despreciable.
4. Se considera flujo unidimensional.
5. Se considera la fuerza de resistencia únicamente en la dirección X.
6. El dardo se considera como una partícula de masa.
7. Se considera que el cambio en la energía potencial es mínimo haciéndolo despreciable.
8. Los esfuerzos cortantes dentro del volumen de control se desprecian.
9. El aire fuera de la pistola se encuentra a condiciones estandar: 20 °C y 1 atm (absoluta).

Estas suposiciones permiten despreciar pérdidas de energía de bajo interés, como es la energía potencial. Además, reflejan que la única pérdida de energía considerable se da debido a la fuerza de fricción, entre el dardo (polietileno) y el cañón (acero).

Por último, para la descarga de un depósito de gas comprimido se pueden considerar dos escenarios en cuanto a la expansión del gas.

- **Expansión adiabática:** Este modelo funciona para descargas totales y rápidas donde no hay tiempo suficiente para observar un cambio, es decir, no hay transmisión de calor considerable.
- **Expansión Isotérmica:** Este modelo es apropiado cuando la descarga es relativamente lenta, dando paso a la transmisión de calor generando que el gas mantenga su temperatura.

El modelo utilizado para el análisis es la expansión isotérmica debido al funcionamiento de la pistola. Bajo estas suposiciones es posible aplicar la ley de Boyle para representar la

expansión del aire. Dicha ley permite obtener la presión final como una función del tiempo, puesto que la temperatura se mantiene constante en todo el proceso.

3.2. Análisis de esfuerzos del tanque

Para proceder con estos cálculos, primero se obtiene las propiedades del tanque de aire comprimido. Este es de la marca Eclipse ETEK 4 con capacidad máxima de 3000 psi. De acuerdo con el Código ASME Sección VIII – División 1 (Diseño, Fabricación e Inspección de Tanques y Recipientes de Presión) e INEN, se trabaja con aceros fabricados para este rango de presiones. De acuerdo con esto, se obtuvieron los datos mostrados en el ANEXO D: DATOS INICIALES sección 9.4.1. Estos fueron utilizados para calcular el esfuerzo horizontal y el longitudinal, mostrados a continuación.

3.2.1. Esfuerzo horizontal (*Hoop Stress*)

Para empezar a analizar este esfuerzo, se presenta un gráfico del tanque en la Figura 3, en donde se muestra la vista superior y el esfuerzo horizontal distribuido en el mismo.

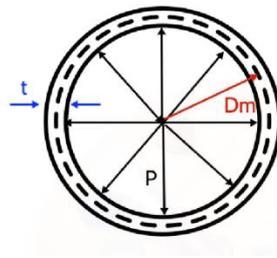


Figura 3. Representación de las fuerzas horizontales dentro del tanque

De la figura anterior se conoce que,

$$P = \text{Presión}$$

$$D_m = \text{diámetro promedio}$$

$$t = \text{Espesor}$$

Donde,

$$D_m = 0.08 \text{ m}$$

Luego se determina el esfuerzo generado en el mismo con la fórmula del esfuerzo de Hoop obtenido del libro *Shigley's Mechanical Engineering Design*, de la ecuación 3.52 (p. 128).

$$\sigma_{\theta} = \frac{P \times D_m}{2t} \quad [3.1]$$

A partir de los datos del ANEXO D: DATOS INICIALES sección 9.4.1, el esfuerzo de Hoop resultante es,

$$\sigma_{\theta} = 82.72 \text{ MPa}$$

3.2.2. Esfuerzo longitudinal (Longitudinal Stress)

Puesto que el tanque es cerrado, se tiene esfuerzo longitudinal en los lados sombreados de la Figura 4.

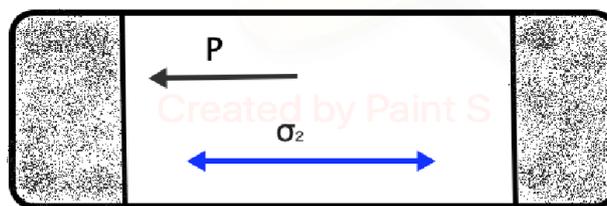


Figura 4. Representación de las fuerzas longitudinales dentro del tanque.

El esfuerzo longitudinal generado se calcula con la fórmula obtenida del libro *Shigley's Mechanical Engineering Design*, de la ecuación 3.51 (p. 128).

$$\sigma_z = \frac{P \times d^2}{(d + 2t)^2 - d^2} \quad [3.2]$$

La ecuación [3.2] funciona para espesores delgados. En un cilindro cerrado, el esfuerzo longitudinal existe debido a la presión en los lados cerrados del tanque. Si se asume que este

esfuerzo es distribuido uniformemente sobre la pared delgada del tanque, la ecuación [3.2] se aproxima a la expresión mostrada en [3.3].

$$\sigma_z = \frac{Pd}{4t} \quad [3.3]$$

Donde se reemplaza los datos del ANEXO D: DATOS INICIALES sección 9.4.1 en la ecuación [3.3] y se obtiene,

$$\sigma_z = 41.36 \text{ MPa}$$

Ahora se procede a analizar el elemento infinitesimal que se muestra Figura 5.

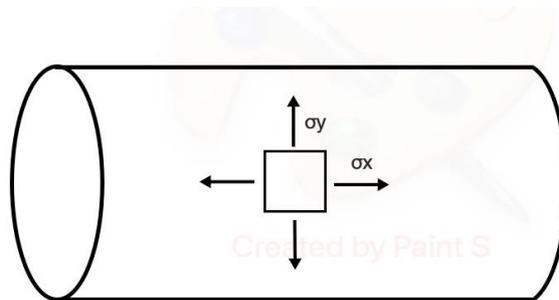


Figura 5: Elemento infinitesimal en el tanque

Cómo este elemento presenta esfuerzo tangencial y esfuerzo longitudinal, se obtiene el esfuerzo de Von Mises mediante la ecuación [3.4].

$$\sigma' = (\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2 - 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \quad [3.4]$$

En donde:

$$\sigma_x = \sigma_\theta$$

$$\sigma_y = \sigma_z$$

$$\tau_{xy} = 0$$

Reemplazando los esfuerzos obtenidos, el esfuerzo de Von Mises resulta en,

$$\sigma' = 71.63 \text{ MPa}$$

Para determinar el factor de seguridad se utiliza la ecuación [3.5].

$$S.F = \frac{\sigma_{allow}}{\sigma'} \quad [3.5]$$

Bajo los parámetros ingresados en los datos del ANEXO D: DATOS INICIALES sección 9.4.1, se obtiene un factor de seguridad de,

$$S.F = 3.62$$

Según la norma *ASME BPVC* para el diseño de tanques, el factor de seguridad debe ser 3.5. Como se observa, el valor obtenido es superior por lo que se dice que el diseño es el adecuado para soportar la presión máxima del tanque.

3.3. Balística interna

La presión interna del reservorio secundario en pistolas de aire comprimido por lo general varía de 200 psi a 800 psi (Custom Products Inline Reg, párr. 2). Sin embargo, se utiliza la presión máxima a la que se considera el diseño. Según la bibliografía las balas de paintball son disparadas a una velocidad de 87 m/s, esto implica una presión acumulada de 305 psi. (Chiarawongse, 2008). Este valor es utilizado para los análisis siguientes.

Bajo la consideración de expansión isotérmica y la suposición de gas ideal, se aplica la ley de Boyle con el fin de representar la expansión del aire y se despeja el volumen final. (ver ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.1).

$$P_{(t)} = \frac{P_0 * V_0}{V_{(t)}} \quad [3.6]$$

El volumen final se expresa de la siguiente manera.

$$V_{(t)} = V_0 + A * x_{(t)} \quad [3.7]$$

En donde $A * x_{(t)}$ es el volumen del cañón y $x_{(t)}$ es el desplazamiento a lo largo de este. Se utiliza la fórmula de relación entre presión y fuerza.

$$F = P_{(t)} * A \quad [3.8]$$

En donde $P_{(t)}$ es la presión aplicada al dardo por el aire comprimido en un determinado tiempo y A es el área transversal del cañón. Reemplazando la ec. [3.6] y [3.7] en la [3.8] y se obtiene,

$$F = \frac{P_0 * V_0}{V_0 + A * x_{(t)}} * A \quad [3.9]$$

Se aplica la segunda Ley de Newton.

$$\vec{F} = m * \vec{a}$$

En donde se realiza el análisis de fuerzas, como se muestra en la Figura 6:

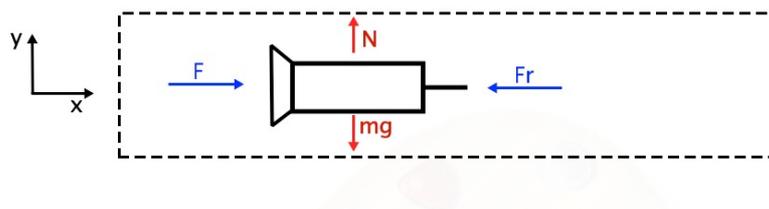


Figura 6. Diagrama del cuerpo libre del dardo dentro del cañón

Del análisis de fuerzas en el eje X se obtiene,

$$F - F_r = m * a_x$$

Y se reemplaza la ec. [3.9] para obtener,

$$\frac{P_0 * V_0 * A}{V_0 + A * x_{(t)}} - F_r = m * a_x \quad [3.10]$$

Se reemplaza en la ecuación [3.10] la siguiente ecuación de dinámica obtenida del capítulo 12 del libro de *Engineering Mechanics Dynamics* de R. C. Hibbeler Ed. XIII.

$$a_x = x(\ddot{t}) = \dot{x} \frac{dx}{dx} \text{ y que } \dot{x} = v_{(x)}$$

Se obtiene como resultado,

$$\frac{P_0 * V_0 * A}{V_0 + A * x(t)} - F_r = m * v(x) \frac{dv}{dx} \quad [3.11]$$

Se resuelve la integral bajo el procedimiento mostrado en el ANEXO C:

RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.2 y se obtiene el siguiente resultado,

$$P_0 * V_0 * \ln\left(1 + \frac{A * L}{V_{(0)}}\right) - F_r * x = \frac{1}{2} m v(x)^2 \quad [3.12]$$

		
Energía W generada debido a la expansión del gas desde su estado inicial al estado final	Energía disipada debido a la fricción	Energía cinética

Se despeja la velocidad en función de la posición, con x igual a L. (ver ANEXO C:

RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.3).

$$v(L) = \sqrt{\frac{2}{m} \left[P_0 * V_0 * \ln\left(1 + \frac{A * L}{V_{(0)}}\right) - F_r * L \right]} \quad [3.13]$$

A partir de los datos del ANEXO D: DATOS INICIALES sección 9.4.2. y de la Figura 6, se obtiene el valor de la fuerza de rozamiento, la cual resulta en,

$$F_r = u_D * N \text{ (Fuerza de fricción entre el dardo y el cañón)}$$

$$F_r = (0.17) * (0.098) = 0.0166N$$

Remplazando todos los datos ANEXO D: DATOS INICIALES sección 9.4.2. y la fuerza de rozamiento en la ec. [3.13]. Se obtiene:

$$v_{(L=0.6m)} = 120.54 \frac{m}{s}$$

Este valor representa la velocidad del proyectil (dardo) a la salida del cañón, tomando en cuenta una presión inicial de 2.1×10^6 Pa.

3.4. Balística externa

Los cálculos mostrados desde este punto continúan exactamente desde el punto en el que termina el paso anterior. El diagrama de la dinámica del disparo se muestra en la Figura 7.

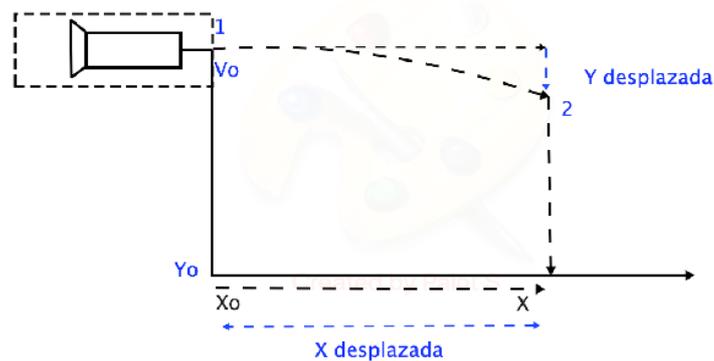


Figura 7. Diagrama dinámico del dardo en el ambiente.

El tiro se lo realiza al aire libre, por lo que se considera la resistencia del aire y se procede a calcular la fuerza de arrastre.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_{aire} C_D V_{(t)}^2 A_{dardo} \quad [3.14]$$

En donde:

C_D : Es el coeficiente de arrastre

Para esto, se calcula el número de Reynolds de la siguiente ecuación,

$$Re = \frac{\rho_o V_o l}{u} \quad [3.15]$$

Se utilizan los datos del ANEXO D: DATOS INICIALES sección 9.4.3. Reemplazando en la ec. [3.15], se obtiene:

$$Re = 1037621.35$$

Como el número de Reynolds es $> 10^5$ se considera que el fluido es turbulento. Obtener el número de Reynolds nos permite calcular el coeficiente de arrastre. De la Figura 9.31 en la página 533 del libro de *Fundamentals of Fluid Mechanics Ed. VII*, se obtiene que el coeficiente de arrastre es aproximadamente 0.85 (estos cálculos se estudian más profundo en la sección 9.4.). (ver ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINAMICA DEL FLUIDO sección 9.6.7).

$$C_D = 0.85$$

Se procede a calcular la velocidad terminal. La velocidad terminal es la que se obtiene en el punto en el que la fuerza de arrastre se balancea con la fuerza gravitacional de un proyectil que cae verticalmente. De acuerdo con el texto *Velocidad terminal de una esfera descendente y la viscosidad de fluidos: diferencia entre fluidos newtonianos y no newtonianos*, se explica que esto pasa cuando las fuerzas de fricción o de resistencia del aire impiden que la velocidad aumente sin límite de tal manera que en algún punto el objeto que cae verticalmente alcanza una velocidad constante denominada velocidad terminal (P.379). Para obtener la V_t partimos de la definición teórica de la velocidad terminal explicada previamente.

$$\sum F_y = -W - F_D = 0$$

A partir del ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.4; se obtiene la siguiente ecuación,

$$V_t = \sqrt{\frac{2 * m_d * g}{C_d * \rho_{aire} * A_d}} \quad [3.16]$$

Se reemplaza los datos del ANEXO D: DATOS INICIALES secciones 9.4.2 y 9.4.3; que se involucran en la ec. [3.16] para obtener,

$$V_t = 40.818 \frac{m}{s}$$

Por otro lado, se tiene 3 posibles casos en un tiro parabólico.

- 1) Asenso vertical
- 2) Trayectoria Horizontal
- 3) Descenso vertical

Como se muestra en la Figura 7, en el modelo analítico se descarta 1) ya que la pistola esta paralela al suelo al momento del disparo. Por lo tanto, se deben tener en cuenta el caso 2) y 3) para realizar los cálculos.

Entonces se derivan las ecuaciones para el caso 2). Se plantea la Segunda Ley de Newton.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}$$

En donde se sabe que, si se considera la resistencia del aire, existe aceleración en el eje x y el eje y.

$$\vec{a} = \vec{a}_x + \vec{a}_y$$

Debido a la geometría del dardo y el bajo coeficiente de arrastre, para estos cálculos se asume que no existe arrastre en la dirección y. La aceleración en y se considera para el caso 3). En este paso solo analizamos el eje x, de acuerdo a la sumatoria de fuerza se obtiene la ec. [3.17] como se muestra en el ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.5.

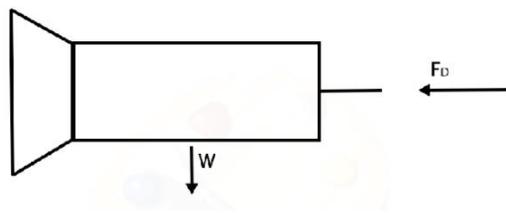


Figura 8. Diagrama de fuerzas del dardo en la trayectoria horizontal.

$$a(t) = \frac{\rho_{aire} C_D V_t^2 A_{dardo}}{2m} \quad [3.17]$$

Si $\dot{v}(t) = a(t)$

$$\frac{dv(t)}{dt} = a(t)$$

Considerando la ecuación obtenida en [3.16] expresada de la siguiente manera,

$$V_t^2 = \frac{2 \cdot m \cdot g}{Cd \cdot \rho_{aire} \cdot Ad}$$

Se reemplazan en [3.17], obteniendo,

$$\frac{dv(t)}{dt} = -\frac{g}{V_t^2} \cdot v^2 \quad [3.18]$$

Se integra para obtener la fórmula de v(t),

$$v(t) = \frac{v_t^2 \cdot v_0}{v_t^2 + g \cdot v_0 \cdot t} \quad [3.19]$$

Se integra nuevamente para obtener x(t),

$$x(t) = \frac{v_t^2}{g} \ln \left(\frac{v_t^2 + g \cdot v_0 \cdot t}{v_t^2} \right) \quad [3.20]$$

Las ecuaciones [3.19] y [3.20] son utilizadas posteriormente en los cálculos para para determinar la presión inicial.

Ahora, analizando en el eje Y sin considerar la fuerza del arrastre, se tiene la ecuación de dinámica obtenida del libro de *Engineering Mechanics Dynamics* de R. C. Hibbeler Ed.

XIII:

$$y = y_o + V_{oy} * t + \frac{1}{2} * a_{cy} * t^2 \quad [3.21]$$

En donde se tiene que, como el dardo sale disparado del cañón en forma horizontal, no hay velocidad inicial en y.

$$V_{oy} = 0$$

Como sucede dentro del campo gravitacional terrestre, se tiene que,

$$a_{cy} = -9.81 \frac{m}{s^2}$$

Por lo que se obtiene $y_o - y$ que representa la distancia que descendió el dardo.

$$y_o - y = -\frac{1}{2} * a_{cy} * t^2 \quad [3.22]$$

Las fórmulas [3.20], [3.21] y [3.22] se utilizan para calcular la velocidad del dardo en x a un tiempo específico a una distancia determinada en x y la caída en y. Un ejemplo del uso de estas ecuaciones se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3: Cálculos de tiempo, velocidad y distancia descendida y a una determinada distancia recorrida x.

x(t) [m]	t [s]	v(t) [m/s]	$y_o - y$ [cm]
20	0.176	107.15	15.19
15	0.13	110.36	8.29
10	0.085	113.68	3.54

Se demuestra que, si la distancia recorrida en x es menor, el tiempo de vuelo es menor y la velocidad de impacto es mayor. Por lo tanto, mientras más haya recorrido, más habrá descendido en y.

3.5. Balística terminal

Se calcula la fuerza de impacto entre dos cuerpos asumiendo que solo existe en el eje X.

$$m\vec{v}_1 + \sum \int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt = m\vec{v}_2$$

Del capítulo *Kinetics of a particle: Impulse and Momentum* del libro *Engineering Mechanics Dynamics* de Hibbeler, del ejemplo 15.8 se realiza la suposición del tiempo de

impacto, por lo que, se dice que $t_2 = 0.01 [s]$. Para proceder con la integral, tenemos $t_1 = 0$ y $t_2 = 0.01s$ (dato supuesto acorde al libro de *Engineering Mechanics Dynamics* de R. C. Hibbeler Ed. XIII).

Si el instante 1 representa al dardo justo antes del impacto con la piel del animal y el instante 2 representa el momento en el que este se detiene, se tiene que,

$$v_2 = 0$$

$$m\vec{v}_1 + \vec{F} \cdot t = 0$$

$$F_x = -\frac{m \cdot v_{x1}}{t} \quad [3.23]$$

Si la masa del dardo es 10 g, el tiempo 0.01 s y considerando que la velocidad de llegada es de 110.36 m/s a 15 m.

$$F_x = -\frac{0.010 \times 110.36}{0.01} = -110.36 N$$

El valor obtenido representa la fuerza externa que actúa en el cuerpo durante el intervalo de tiempo t_1 y t_2 . Es decir, la fuerza de reacción que genera el cuerpo hacia el dardo.

3.6. Diseño del resorte

Se trabaja con el resorte del regulador de presión que conecta el tanque principal con el reservorio secundario. Para el diseño es necesario conocer la elongación máxima, para esto se realiza un balance de fuerzas como se muestra en la Figura 9.

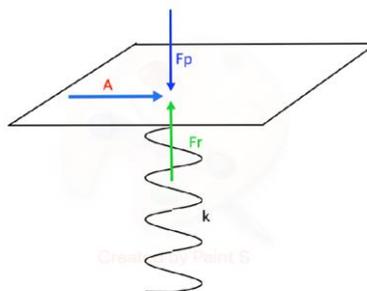


Figura 9. Diagrama de fuerzas del resorte

En donde F_p es la fuerza ocasionada por la presión del reservorio secundario sobre el área de separación de la cámara de aire con el resorte dentro del regulador de presión. Se diseña el resorte en el punto en el que las fuerza se igualan y se llega al equilibrio, por lo que se parte de,

$$F_p = F_r$$

$$P * A = k * x \quad [3.24]$$

En donde:

$$x = \text{compresión del resorte}$$

$$k = \text{constante de rigidez del resorte}$$

$$A = \text{sección transversal del regulador de presión}$$

$$P = \text{presión del sistema de aire secundario}$$

Primero se procede a calcular el valor de la presión P. Para esto, se parte de las ecuaciones de movimiento [3.19] y [3.20] derivadas en cálculos anteriores. De estas ecuaciones se obtiene el valor de la velocidad inicial del dardo (V_0), para luego proceder a calcular la presión del reservorio secundario con la ecuación [3.13].

Se comienza despejando t de las ecuaciones [3.19] y [3.20] para despejar la velocidad inicial mediante el método de igualación.

$$x(t) = \frac{v_t^2}{g} \ln \left(\frac{v_t^2 + g \cdot v_0 \cdot t}{v_t^2} \right)$$

Se despeja t . (ver ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.6).

$$t = \frac{v_t^2 \left(e^{\frac{g \cdot x(t)}{v_t^2}} - 1 \right)}{g \cdot v_0} \quad [3.25]$$

Se toma en cuenta otra ecuación de movimiento.

$$v(t) = \frac{v_t^2 \cdot v_0}{v_t^2 + g \cdot v_0 \cdot t}$$

Se despeja t. (ver ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.7).

$$t = \frac{v_t^2}{g \cdot v_0} \left(\frac{v_0}{v(t)} - 1 \right) \quad [3.26]$$

Se iguala la ecuación [3.25] con la ecuación [3.26] para obtener (ver ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.8)

$$v_0 = v(t) \cdot e^{\frac{g \cdot x(t)}{v_t^2}} \quad [3.27]$$

En el artículo *Evaluation of the Potential for Injury with Remote Drug-Delivery Systems*, existen valores de la velocidad de impacto del dardo que depende del volumen en mL del tranquilizante, la masa y el tipo de inyección. A partir de los 2.5 ml de tranquilizante utilizados, la masa involucrada es de 10 g, y la velocidad de impacto deseeda es de 57.5 m/s (este dato es teórico). Se toma como ejemplo el cálculo a una distancia de 20 metros, debido a que este valor es el escenario más crítico para este estudio.

Se reemplaza los datos [D] del ANEXO D: DATOS INICIALES sección 9.4.4 y se obtiene.

$$v_0 = 76.10 \frac{m}{s}$$

De la fórmula [3.13] derivada para calcular la velocidad inicial utilizada en los cálculos anteriores, se despeja P_0 . (ver ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.9).

$$P_0 = \frac{\frac{v_L^2 \cdot m}{2} + F_r \cdot L}{V_0 \cdot \ln \left(1 + \frac{A \cdot L}{V_0} \right)} \quad [3.28]$$

Se reemplaza los datos [E] del ANEXO C: DATOS INICIALES sección 9.4.4. en la ecuación [3.28] y se obtiene el valor de la presión inicial.

$$P_0 = 837\,038.38 \text{ Pa}$$

Volviendo a la ecuación [3.24]:

$$P * A = k * x$$

En donde el valor k corresponde a la constante de rigidez del resorte actual que se calculó experimentalmente. Se determinó que el valor es de,

$$k = 98 \text{ kN/m.}$$

Se calcula el área transversal de contacto entre el área del reservorio secundario y el resorte con las dimensiones medidas del regulador de presión.

$$A = \frac{\pi}{4} (2 \times 10^{-2})^2 - \frac{\pi}{4} (0.8 \times 10^{-2})^2$$

$$A = 2.64 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Se reemplaza los datos P, A y k para determinar la deformación del resorte. Se obtiene un deformación de,

$$x = 5.66 \times 10^{-3} \text{ m}$$

A continuación, se desea obtener la fuerza del resorte al multiplicar la presión por el área de contacto.

$$F = P \cdot A$$

$$F = 221 \text{ N}$$

Por otro lado, el material del resorte utilizado es Acero Inoxidable, se determinan las propiedades del material a partir del libro *Shigley's Mechanical Engineering Design*, Tabla

10.4. Este dato será utilizado en la ecuación 10.14 del libro ya mencionado (ecuación para un resorte de cara plana).

$$S_{sy} = 0.45 \left(\frac{A}{d^m} \right) \quad [3.29]$$

Para esto, se obtienen las constantes mostradas en los datos [F] del ANEXO D: DATOS INICIALES de la sección 9.4.4. y el valor de d que corresponde al diámetro del material en la Tabla 10.5 del libro *Shigley's Mechanical Engineering Design*. Se procede a reemplazar los datos en la ecuación [3.29].

$$S_{sy} = 103\,542 \text{ psi}$$

Luego, se procede a encontrar los valores de las constantes alfa y beta para encontrar el valor de la constante C que permite la aproximación del diámetro del resorte.

- Alfa.

$$\alpha = \frac{S_{sy}}{2} \quad [3.30]$$

$$\alpha = 70\,364 \text{ psi}$$

- Beta.

$$\beta = \frac{8(1 + \xi)F_{max}}{\pi \cdot d^2} \quad [3.31]$$

En donde:

$$\xi = 0.15. \text{ (valor recomendado)}$$

$$F_{max} = 221N = 49lbf$$

Se reemplazan los datos en la ec. [3.31]

$$\beta = 13\,726 \text{ psi}$$

- Constante C

$$C = \frac{2\alpha - \beta}{4\beta} + \sqrt{\left(\frac{2\alpha - \beta}{4\beta}\right)^2 - \frac{3\alpha}{4\beta}} \quad [3.32]$$

Se reemplaza los datos de α y β en la ecuación [3.32] y se obtiene,

$$C = 3.54$$

De acuerdo con el libro de *Shigley's Mechanical Engineering Design*, el valor de C tiene que estar entre $4 < C < 12$. El material seleccionado tiene definido el diámetro entre 0.1 in a 0.2 in, debido que a la constante C depende del diámetro del material, este debe aumentar para que la constante C se encuentre en el rango establecida. Seleccionando un nuevo diámetro del material y siguiendo el proceso previamente descrito, se obtiene como resultado:

$$d = 0.12 \text{ in}$$

$$C = 5.27$$

$$D = 0.63 \text{ in} = 1.6 \text{ cm}$$

$$N_a = 5 \text{ vueltas}$$

4. MODELO COMPUTACIONAL

Se desarrolló tres simulaciones las cuales abalan las necesidades del cliente. El arma requiere diferentes tipos de parámetros tales como: presión, velocidad del hocico, distancia segura de disparo y fuerza de impacto. Para cumplir los parámetros se desarrollaron 3 simulaciones que son: análisis de esfuerzos, análisis de la dinámica del fluido y el análisis de la dinámica del dardo. Los programas utilizados en las simulaciones utilizan condiciones reales como las propiedades de los materiales, velocidad, fuerza, impulso, presión, entre otros.

4.1. Análisis de esfuerzos

Para comprobar los riesgos del disparo, se empieza por realizar simulaciones que muestren el comportamiento de dos distintas partes de la pistola al momento en el que se empieza a trabajar con aire comprimido. Estas son el tanque de almacenamiento y el resorte del regulador de presión, el cual regula la presión de salida y por lo tanto controla la velocidad del proyectil. Para realizar las simulaciones, se utilizaron dos programas de CAD 3D: Autodesk FUSION 360 e Inventor Nastran 2020. Los resultados obtenidos por los programas son escenarios que se asemejan a la realidad y permitirán analizar los esfuerzos generados, la deformación y el factor de seguridad.

4.1.1. *Tanque de aire comprimido*

El tanque de almacenamiento es en donde se acumula todo el volumen de aire comprimido para disparar el dardo anestésico. Se considera necesario analizar este parte de la pistola ya que es en donde se concentra la presión más alta, 3000 psi. En primer lugar, se obtuvieron las dimensiones del tanque para realizar un modelo 3D. El tanque cumple con la

norma *ASME BPVC (Boiler & Pressure Vessel Code)*, la cual rige el diseño de tanques a presión. En la Figura 10 se observa el diseño realizado en Fusion 360.



Figura 10. Tanque 3000 psi.

Debido a la simetría del tanque, para colocar las cargas de presión, es necesario realizar un corte vertical por la mitad del tanque. De esta manera se puede acceder a las caras internas y colocar la presión deseada. Las propiedades del material se observan en los datos [F]. (ver ANEXO E: MODELO COMPUTACIONAL DEL ANÁLISIS DE ESFUERZOS sección 9.5.1).

I. Simulación

Para realizar la simulación, primero se colocaron todas las propiedades del material para el tanque. Luego, como se observa en la Figura 11, se colocan las cargas que son presiones previamente definidas.

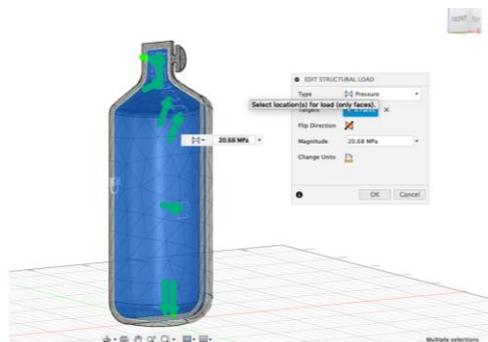


Figura 11. Aplicación de cargas y propiedades mecánicas del material.

Después, se procede a correr la simulación. En la Figura 12 se muestra el primer resultado que corresponde al factor de seguridad. Se puede observar que en las zonas donde los esfuerzos son menores, el factor de seguridad aumenta y viceversa. La zona más crítica se encuentra en toda la carcasa vertical del tanque, lo que da como resultado un factor de seguridad mínimo de 3.214.

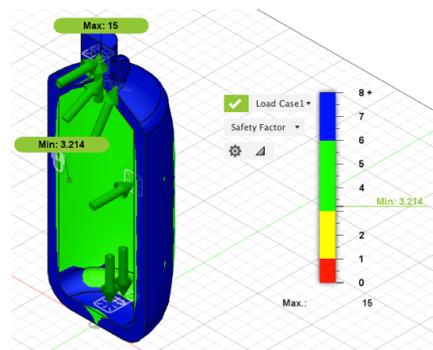


Figura 12. Simulación, resultado factor de seguridad.

Al realizar la simulación con las condiciones anteriores, el factor de seguridad resulta en 3.214, por lo que la normativa no se cumple según el Código *ASME* Sección VIII – División 1 (Diseño, Fabricación e Inspección de Tanques y Recipientes de Presión) e *INEN* el cual dice que para el tanque debe ser fabricado con un factor de seguridad de 3.5. Sin embargo, se puede obtener un valor cercano, por lo que se concluye que el análisis es exitoso confirmando la suposición del espesor del material.

Luego del factor de seguridad, se determinó el esfuerzo generado en el material. Para esto, se utiliza la teoría del esfuerzo de Von-Misses como se muestra a continuación.

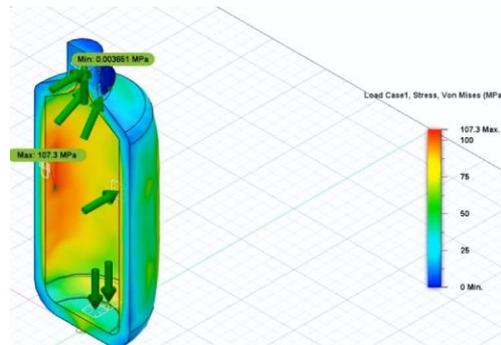


Figura 13. Simulación, resultado Esfuerzo de Von Mises

En la Figura 13, las secciones de color rojo representan el esfuerzo máximo al cual se puede llegar y el azul el esfuerzo mínimo (los dos medidos en MPa). Además, se observa que el esfuerzo máximo es de 107.3 MPa y se ubica en los laterales del tanque, lo que corrobora que el factor de seguridad sea menor en esta área.

4.1.2. Resorte

A continuación, se realiza la simulación del resorte que se encuentra dentro del regulador de presión y es la pieza que acciona el mecanismo de la válvula de control. El resorte es la parte más importante del sistema, ya que permite regular la presión de salida del proyectil. Para esto, se toman las dimensiones del resorte del plano realizado (ver ANEXO B: PLANOS DE MANUFACTURA). Para la simulación del resorte se debe aplicar una fuerza, la cual se determinó de las fórmulas derivadas en cálculos previos, y se colocan las propiedades que se muestran en los datos del ANEXO E: MODELO COMPUTACIONAL DEL ANÁLISIS DE ESFUERZOS sección 9.5.2.



Figura 14. Modelado del resorte.

Luego de haber modelado, se aplican todas las propiedades al material y se añaden dos soportes: uno arriba y otro en la parte baja del resorte; para que la fuerza aplicada se distribuya uniformemente. La fuerza utilizada corresponde a la presión máxima de trabajo, 221 N.

I. Simulación resorte.

A continuación, se presenta el resultado del factor de seguridad mostrado en la Figura 15 en donde se observa que las secciones de color azul son un factor de seguridad mayor a 8, lo que significa que los esfuerzos generados en estas zonas no son críticos y las zonas amarillas representan los lugares donde los esfuerzos son más críticos para el resorte. Se determina que el factor de seguridad mínimo es de 1.74, el cual es constante a lo largo de todo el muelle.

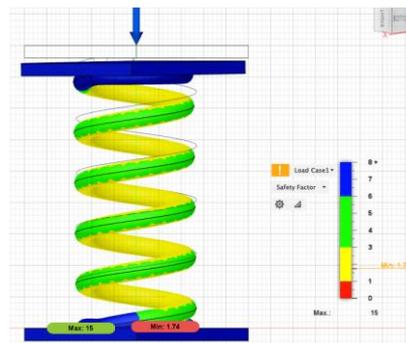


Figura 15. Simulación, resultado factor de seguridad.

Luego del factor de seguridad se determinó el esfuerzo generado en el material y para esto se utilizó el esfuerzo de Von-Mises. En esta figura, las secciones de color rojo representan los esfuerzos máximos a los cuales se somete la pieza, medidos en MPa. Se observa que el esfuerzo máximo es de 831.1MPa y se ubica en la zona interior del muelle.

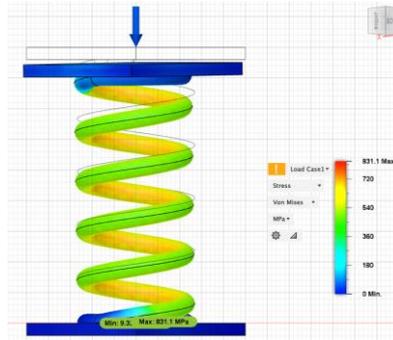


Figura 16. Simulación, resultado Esfuerzo de Von Mises Fuente.

Por último, se determina el desplazamiento resultante de la compresión en el resorte. En donde se observa que la zona roja es la mayor parte desplazada y la zona azul es la menor. El desplazamiento máximo obtenido es de 5.837 mm.

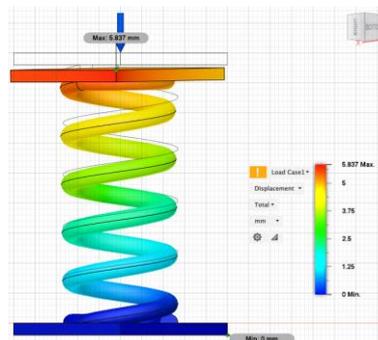


Figura 17. Simulación, desplazamiento del resorte

II. Resultados

Se realizan simulaciones en conjunto con la variación de distancia a la que se desea disparar y con distintas fuerzas de impacto. La fuerza que ejerce el resorte se calcula dependiendo de la presión necesaria en el reservorio secundario para que el dardo tenga una velocidad en la salida del cañón determinada por la fuerza de impacto. Todo este proceso fue detallado en los cálculos realizados en la sección 3.6. Se realiza una tabla de cada distancia de disparo para obtener la presión necesaria y observar cómo se comporta el resorte para las

distintas presiones. Según las necesidades determinadas se realizan tablas para 5, 10, 15, 20 metros, todas con fuerzas de impacto variables. En la Tabla 4, los valores de las columnas de la izquierda fueron calculados mediante las ecuaciones derivadas previamente, y en la derecha se encuentran los valores resultantes de la simulación realizada en Autodesk Fusion 360. Para otras distancias ver ANEXO E: MODELO COMPUTACIONAL DEL ANÁLISIS DE ESFUERZOS sección 9.5.3.

Tabla 4: Resultados de la simulación obtenidos a tres distintas fuerzas calculadas a una distancia de 20 metros

Para x = 20 metros								
Fuerza de impacto en el animal [N]		Velocidad de salida del cañón [m/s]	Presión inicial en la cámara secundaria (Psi)	Presión inicial en la cámara secundaria (kPa)	Fuerza en el resorte [F]	Factor de seguridad	Stress max Von Mises [MPa]	Desplazamiento en el eje Y [mm]
Máx.	67.34	75.69	120.14	828.328	218.68	1.76	822.4	5.775
Med	62.97	70.76	105.02	724.083	191.16	2.01	718.9	5.049
Mín.	38.58	43.06	38.91	268.283	70.83	5.43	266.4	1.871

En la Tabla 4, se puede observar que para este caso la fuerza máxima de impacto es de 67.34 N, para evitar que el factor de seguridad del resorte sea menor a 1. Lo óptimo (de acuerdo con las investigaciones encontradas y mostradas previamente), sería trabajar para una fuerza de impacto hasta de 70 N.

4.2. Análisis de la dinámica del fluido

Se procedió a realizar la simulación de la despresurización del aire desde el regulador de presión hasta el momento en que inicia el movimiento del dardo, y al momento de salida. El objetivo fue analizar el comportamiento del fluido durante este proceso. Por otro lado, se desea obtener el impulso del dardo. Para esta simulación se utilizó el programa CFD Autodesk

2019. Los resultados obtenidos por el programa son escenarios que se asemejan a la realidad y permitirán analizar el comportamiento del fluido y su influencia en la velocidad del dardo.

4.2.1. Expansión interna del aire

Para realizar la expansión interna del aire dentro del cañón se toma en cuenta los datos presentados en el ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO sección 9.6.1. La simulación se corrió para 30 iteraciones, cada una de 0.001 segundos. Los datos encontrados se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Resultados de la simulación obtenidos a los datos iniciales propuestos

Resultados Simulación B				
Steps		Tiempo [s]	Temperatura (C)	Presión [Pa]
Máx.	30	0.030	26	504812
Med.	15	0.015	26	366261
Mín.	1	0.001	26	0

Con la ayuda del software Autodesk CFD 2019, se pudo realizar la simulación correspondiente. El primer paso fue generar un volumen que atraviesa todo el sistema de conexión, en donde se coloca como fluido al aire. Los materiales de la pistola son obtenidos directamente de Autodesk Inventor, de esta manera se evita la generación de nuevos materiales. En el paso siguiente se colocan las condiciones de borde: el parámetro de la precisión inicial; este valor es de 652 622 Pa y la segunda condición de borde se coloca en la salida del cañón; este valor corresponde a la presión atmosférica. Dado que los parámetros de simulación corresponden a presiones manométricas, la presión de la segunda condición de borde es igual a 0 Pa. Por último, se coloca la condición inicial, en este caso la velocidad del fluido que se encuentra comprimido en una cámara de reserva sin movimiento.

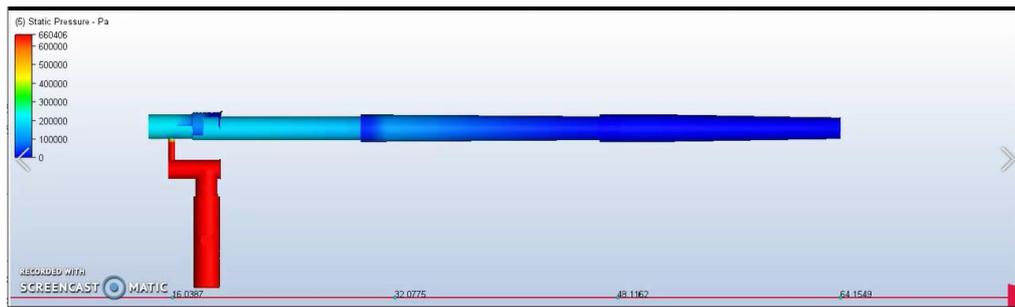


Figura 18. Variación de la presión dentro del mecanismo de la pistola.

En la Figura 18 se puede observar la variación de presión a través de todo el sistema de tuberías, en donde se muestra únicamente el fluido. Como se puede identificar el aire aumenta su presión conforme los ductos cambian de forma o de dimensión. Los cálculos realizados previamente no asumen variaciones de presión en la tubería, por lo que son solo una aproximación. La velocidad del hocico se calcula a partir de la presión máxima acumulada, la importancia de esta simulación radica en obtener la presión del aire cuando este hace contacto con el dardo. De esta manera, la presión obtenida en el punto de interés es de 366 261 Pa, este valor es utilizado para realizar la siguiente simulación, la cual involucra al cañón y al dardo.

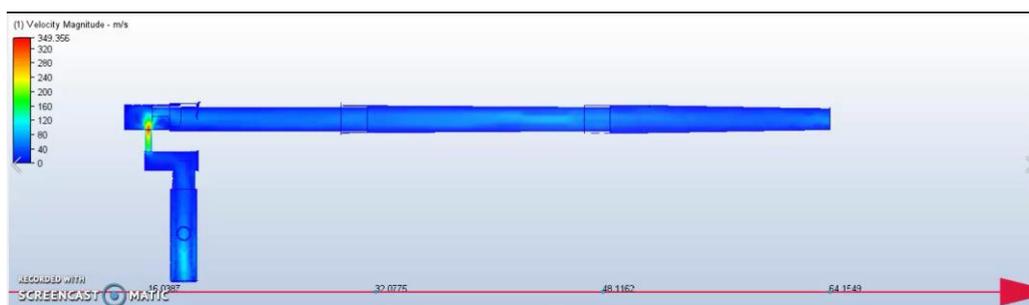


Figura 19. Vectores de velocidad del flujo de aire que atraviesa por el sistema interno.

La Figura 19 muestra el módulo de velocidad del fluido a lo largo de toda la tubería, como es de suponer el aire adquiere mayor velocidad cuando sale de la recámara, pues la reducción del área genera un aumento en la velocidad. Gracias a esto, la velocidad máxima

obtenida en ese punto es de 349 m/s. A partir de ese punto el aire desacelera drásticamente, obteniendo una velocidad de 252 m/s.

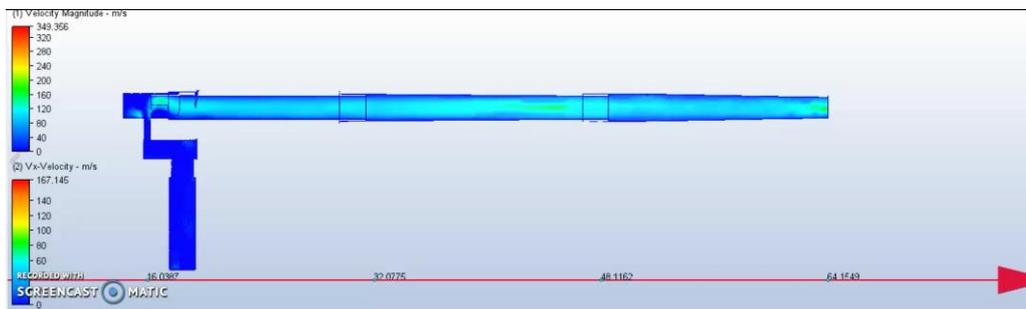


Figura 20. Velocidad del aire en la dirección x.

En la Figura 20 se observa la magnitud de la velocidad del aire en el eje x. Se puede observar que el aire desacelera conforme este se expande. La velocidad máxima en la dirección x es de 167 m/s, mientras que la velocidad en el punto de salida es de 87.64 m/s.

4.2.2. Impulso del dardo

El propósito de esta simulación es visualizar el comportamiento del fluido (aire compresible) cuando el dardo es impulsado por el cañón debido a la liberación del aire a presión. Cuando se realizó el modelo analítico siguiendo el orden mostrado en la Figura 21, se consideraba que la presión inicial obtenida era la acumulada en el reservorio secundario. La simulación 4.2.1 sirve para observar cómo se genera la expansión del aire desde el reservorio secundario hasta el punto en donde golpea al dardo y lograr calcular la presión real con la que lo impulsa. De esa manera, se propone comparar el error generado por esta suposición al simular dos distintos escenarios: un escenario con la presión calculada sin considerar la expansión del aire dentro de la pistola y un escenario con la presión obtenida después de la expansión del aire.

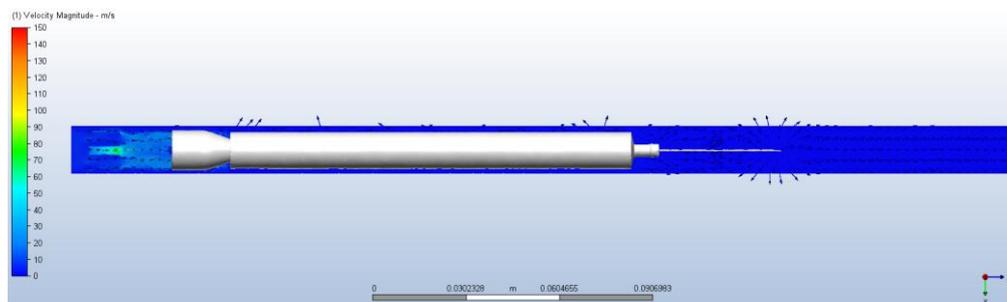


Figura 21. Secuencia de pasos para obtener la presión inicial

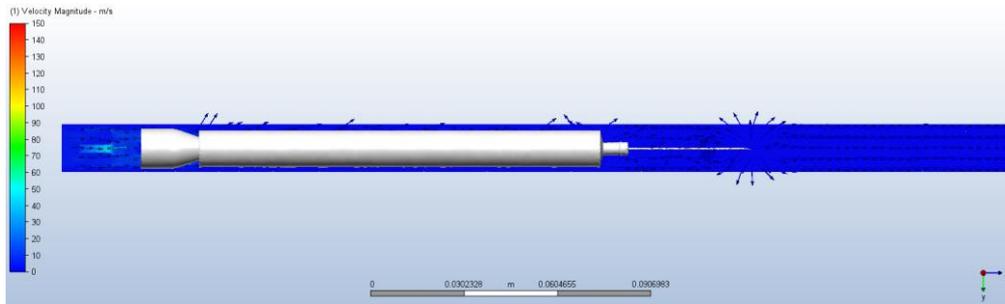
Se utilizó el modelo 3D mostrado en la ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO sección 9.6.4. Dentro de CFD Autodesk, se crea un volumen externo con la forma de un prisma rectangular que tiene las dimensiones aproximadas del cañón. Este volumen contiene aire y se coloca las propiedades mostradas en los datos [I]. (ver ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO sección 9.6.3.). Por otro lado, las condiciones de trabajo para cada simulación varían solo en la condición de borde la presión inicial, de ahí se trabajó con los valores mostrados en los datos [J] y [K]. (ver ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO sección 9.6.3.). Para ambos casos, se corrió la simulación para 50 iteraciones (Escenario A) y para 55 iteraciones (Escenario B) y con un tiempo entre cada iteración de 0.001s.

VELOCIDAD

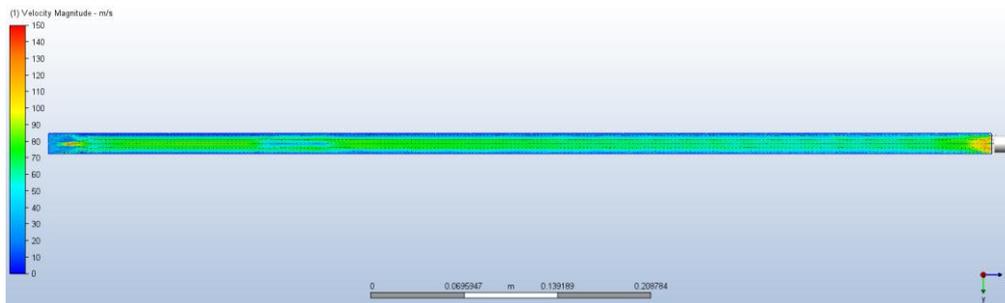
Se muestran los resultados de ambos casos para las iteraciones de 10 y la última iteración antes de que el dardo salga del cañón para ambos casos.



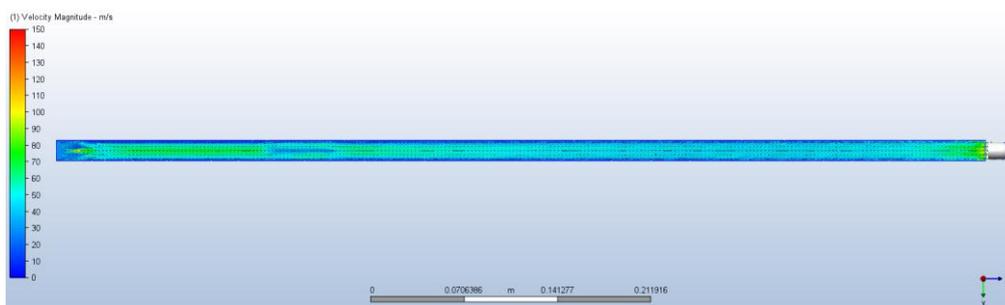
a) Simulación A: step 10.



b) Simulación B: step 10



c) Simulación A: Step 50 cuando ya sale del cañón.



d) Simulación B: Step 55 cuando ya sale del cañón.

Figura 22. Gráficas de velocidad comparando los dos escenarios

En la Figura 22, se puede observar como el fluido se comporta en términos de la velocidad mientras el dardo lo atraviesa. Tomando en consideración la figura del ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO sección 9.6.5 en donde se muestra cómo sería el comportamiento del perfil de velocidad en un fluido completamente laminar, se procede a analizar las figuras mostradas anteriormente.

Primero, en las Figuras 22 a) y 22 b) se puede observar el momento del impulso del dardo en ambos escenarios. Debido a que la presión del escenario A es mayor que la de la B, se observa en la Figura 22 a) que el dardo avanza más que en la Figura 22 b). De acuerdo con la figura de la sección 9.6.5 del ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO, el perfil de velocidad “ideal” tiende a comportarse como una parábola, en donde el fluido tiene una velocidad de cero en los extremos que tocan con las paredes del tubo debido a los efectos de la viscosidad. Considerando que en la simulación se trabaja con un modelo de turbulencia; es decir, el fluido no es laminar; y que el perfil de velocidad no formará una parábola exacta, se observa como la velocidad del fluido empieza desde el centro del tubo y poco a poco se expande de manera irregular; no obstante, los extremos cercanos a la pared del cañón mantienen velocidades de cero.

Finalmente, en las Figuras 22 c) y 22 d) se puede observar cómo terminan los perfiles de velocidad en el instante en el que el dardo sale del cañón. En el escenario A el dardo ya se encuentra totalmente fuera en la iteración 50 (0.050 s), en cambio para el escenario B el dardo llega a salir en la iteración 55 (0.055 s). Es decir, el cambio de 652 622 Pa a 366 261 Pa como presión inicial hace que el dardo salga 0.005 s más rápido.

Después, si se mide la velocidad en el mismo punto final para ambos escenarios, se obtiene que para el escenario A, la velocidad es de aproximadamente 100-120 m/s y para el escenario B la velocidad es de aproximadamente 80-100 m/s (de acuerdo con la Figura 22 c) y 22 d)). Estos valores obtenidos corresponden a la velocidad del fluido.

Por otro lado, si no se considera que el fluido es compresible, la presión ya no es la misma en todos los puntos, entonces la presión con la que llega al dardo es la resultante de la expansión interna de la pistola, es decir, consideramos el escenario B. Para ambos escenarios, se calcula la velocidad de salida en el punto final, cuyas coordenadas se muestran en los datos de la Tabla 6.

Tabla 6. Coordenadas Punto Final

X [m]	Y [m]	Z [m]
-0.0374	-0.0166	0.6

Los datos de la Tabla 6 corresponden a las coordenadas del que se consideró como punto final. Hay que tomar en cuenta que el punto de partida de las coordenadas locales es el centro de masa del objeto y no es simétrico ni en x ni en y debido a que la aguja tiene la punta afilada.

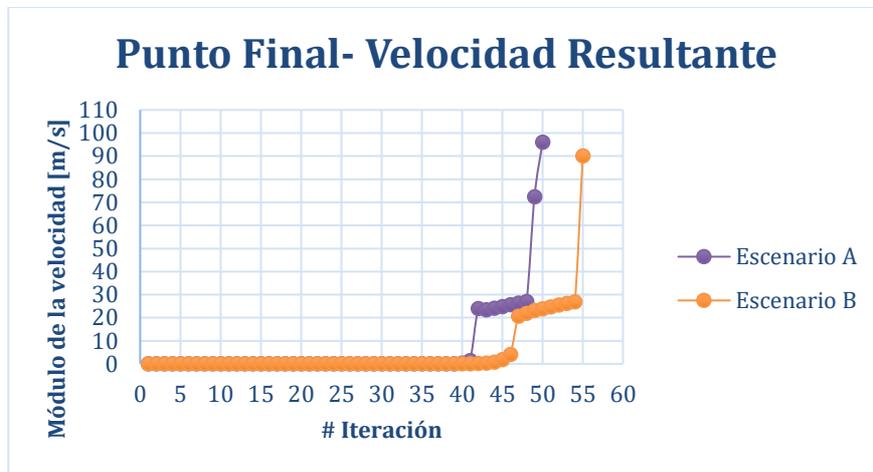


Figura 23. Velocidad del Punto Final a lo largo de la simulación.

En la Figura 23, se grafica la velocidad en función del número de iteración realizado, tomando en cuenta que cada iteración tiene un paso de 0.001 s. Se observa que para el escenario A, a partir de la iteración 40 la velocidad empieza a aumentar y para el escenario B, esto pasa a partir de la iteración 45. Lo más relevante de la Figura 23, es la velocidad final calculada en dicho punto. Para el escenario A, el que no considera la expansión del aire y trabaja con la presión más alta, se tiene una velocidad 96 m/s a los 0.050 s; en cambio, para el escenario B se tiene una velocidad de 90 m/s a los 0.055s.

PRESIÓN

En el ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO sección 9.6.6 se muestra la distribución de presión generada por la expansión del aire para el escenario B. Para esto, se consideraron tres iteraciones: 1, 35 y 55. De esta manera, se observa cómo se expande el aire a lo largo de la simulación del escenario B. El gradiente observado se debe a que las condiciones de borde son fijas durante la simulación para que se cree el diferencial de presión que mueve al dardo.

NÚMERO DE MACH

Se calculó el número de Mach en cada iteración para ambos escenarios. El número de mach permite observar si el comportamiento del fluido es subsónico, sónico o supersónico. El valor que permite analizar el comportamiento del fluido en el instante que el dardo sale del cañón, es el que corresponde al Punto Final con coordenadas en la Tabla 6. En la Tabla 7 se observa el valor del número de Mach obtenido para cada escenario.

Tabla 7. Número de Mach para el Punto Final

Posición	Escenario A	Escenario B
Coordenadas punto final	0.29278	0.261092

Se puede observar que, para ambos casos, el número de Mach es menor a 1, lo que indica que el fluido es subsónico. De acuerdo con libro de *Fundamentals of Fluid Dynamics Ed. VII*, se tiene que el coeficiente de arrastre para un fluido compresible está en función del número de Reynolds y del número de Mach. Para números de Mach < 0.5 , los efectos de compresibilidad no son importantes para obtener el coeficiente de arrastre. En la Tabla 8 se muestra los datos obtenidos de la simulación para calcular el número de Reynolds para ambos casos de acuerdo con la fórmula [3.15]. Se tiene que la longitud corresponde a la longitud del dardo (parte cilíndrica) mostrada en la figura de la sección 9.6.4 del ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DEL FLUIDO.

Tabla 8. Número de Reynolds

Caso	Densidad [kg/m ³]	Velocidad [m/s]	Viscosidad [Pa*s]	Número de Reynolds
Escenario A	1.5166	96	1.82E-05	1.01 E+05
Escenario B	1.36241	90	1.82E-05	8.10 E+04

Como se observa en la Tabla 8, para el escenario B, se obtiene un número de Reynolds menor a 10^5 debido a que se considera el cambio de densidad del aire. Puesto que no se puede utilizar el coeficiente de Mach para calcular el coeficiente de arrastre, se procede a asumir que la diferencia del número de Reynolds es insignificante para cumplir con la condición mostrada en la figura de la sección 9.6.7 del ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DEL DARDO. De esta manera, se puede confirmar que el coeficiente de arrastre es de 0.85.

4.3. Análisis de la dinámica del dardo

Puesto que uno de los requerimientos principales del equipo es una diferencia de altura máxima de ± 5 cm, es importante conocer el punto de impacto o la trayectoria del proyectil utilizado. Para esto se realiza un programa en MATLAB que permite graficar la trayectoria a partir de las ecuaciones de movimiento. Para realizar la simulación de la balística del dardo se tomó en cuenta la resistencia del aire generada por la geometría del dardo. Adicionalmente, se muestra en la Tabla 9 las suposiciones realizadas para esta simulación. Explicando el punto 2 de la Tabla 9, el coeficiente de arrastre se asumió constante a pesar de que el valor de Reynolds cambiaba para cada simulación. Esto se explica en el apartado anterior.

Tabla 9. Suposiciones para la balística del dardo

#	Suposiciones:
1.	Se considera que el proyectil tiene forma cilíndrica y la dinámica del fluido solo genera fuerza de arrastre en la cara frontal
2.	El coeficiente de arrastre (C_D) es aproximadamente constante en todo el trayecto.
3.	Aceleración generada por la gravedad es constante.
4.	No hay efecto del viento.
5.	Se considera al dardo como una partícula

Como se trabaja con las ecuaciones demostradas a mano, se calcula la velocidad terminal utilizando la ecuación [3.16]. Los datos utilizados para llevar a cabo estos cálculos se encuentran en el Anexo G: MODELO COMPUTACIONAL ANALISIS DE LA DINÁMICA DEL DARDO secciones 9.7.1, 9.7.2 y 9.7.3.

4.3.1. Ecuaciones de movimiento

Previo a realizar el código en MATLAB, se procede a derivar las ecuaciones de movimiento de tiro parabólico del dardo considerando el arrastre. Esta vez, se considera la fuerza de resistencia del aire en el movimiento vertical ascendente y movimiento horizontal.

$$\sum F_x = -F_D = m \cdot a(t)$$

Se utiliza la ec. [3.19] obtenida en el modelo analítico y por otro lado, se realiza lo mismo para el eje Y ya que el modelo computacional si considera la resistencia del aire en este eje. A partir de esto se aplica la segunda ley de Newton.

$$\sum F_y = -F_D - m \cdot g = m \cdot a(t)$$

Reemplazando la fuerza del arrastre y la constante de la velocidad terminal, según el procedimiento mostrado en el ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.12.

$$v_y(t) = \frac{v_t \cdot \left(v_{0y} - v_t \tan\left(\frac{g \cdot t}{v_t}\right) \right)}{v_t + \left(v_{0y} \cdot \tan\left(\frac{g \cdot t}{v_t}\right) \right)} \quad [4.2]$$

A partir de estas ecuaciones se integra para obtener las ecuaciones de posición. El código desarrollado en MATLAB utiliza las ecuaciones expuestas para obtener gráficas de trayectoria. (ver ANEXO G: MODELO COMPUTACIONAL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL DARDO).

4.3.2. Resultados

Se muestran los resultados para un ángulo de inclinación de cero grados a distintas distancias para 4 rangos de fuerza de impacto. Para cada distancia analizada, se tomó como valor máximo a la serie de datos en los que la presión era menor a 837 038 Pa. Esto se hizo para que cumpla con los requerimientos del resorte diseñado previamente. Si se considera un valor de error máximo de 50 mm, las condiciones de tiro que cumplen esto son las que tienen de respuesta la diferencia de altura en color negro. Todas las respuestas de rojo son las condiciones que no cumplen el rango establecido con un ángulo de disparo de 0° , ver la sección 9.7.5 y 9.7.7 del ANEXO G: MODELO COMPUTACIONAL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL DARDO. Se realizan las siguientes iteraciones para obtener a qué un ángulo de tiro se contrarresta esta pérdida, sin embargo, como se tiene una masa de 10 g para 2.5 ml de tranquilizante y 13 g para 5 ml de tranquilizante a velocidades altas de disparo, la sensibilidad de la trayectoria es alta. Se presentan las iteraciones realizadas con los ángulos encontrados que permiten que el tiro se encuentre dentro del rango de error establecido. (ver ANEXO G: MODELO COMPUTACIONAL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL DARDO secciones 9.7.6 y 9.7.8). Como se puede observar, la altura de choque es menor para la masa de 10 g que para la de 13 g. Esto se debe a que la velocidad de salida de la masa es menor; sin embargo, si se utiliza la misma velocidad de salida, la caída de la masa 2 es menor debido a su densidad seccional ya que esto permite que se conserve la velocidad con mayor facilidad.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Puesto que se realizaron suposiciones tanto para el modelo analítico como para el modelo computacional, se procede a realizar una comparación de los resultados.

5.1. Comparación entre el modelo analítico y computacional: tanque 3000 psi.

Según la norma *ASME BPVC*¹, se tiene que el factor de seguridad apropiado para el diseño de recipientes a presión es de 3.5. Bajo esta especificación con una presión de reserva de 2.1×10^6 Pa (3000 psi) y con un espesor del material de 10 mm, se obtiene un factor de seguridad de 3.62 para el modelo analítico y un factor de seguridad de 3.214 para el modelo computacional. El error resultante es del 11%. Como se observa el valor obtenido por el método computacional no cumple con la norma especificada por un 8.17%, se concluye que el análisis debe realizarse bajo distintos tipos de mallado para comprobar si el valor es dependiente del mismo.

Tabla 10. Factor de seguridad y valor del esfuerzo de Von Misses del tanque de aire comprimido para ambos modelos

TANQUE	Factor de seguridad	Esfuerzo de Von Mises
Modelo Analítico	3.62	71.63 MPa
Modelo Computacional	3.214	107.3MPa
Error	11%	40%

Por otra parte, al analizar el esfuerzo de Von Mises se tiene diferentes valores en el modelo analítico y computacional. Para modelo analítico se obtuvo un valor de 71.63MPa y para el computacional de 107.3MPa con un error del 40%. Esto se debe a que el análisis del

¹ Recipientes a presión, p.25. (correspondiente a Código ASME Sección VIII – División 1 (Diseño, Fabricación e Inspección de Tanques y Recipientes de Presión))

modelo computacional utiliza esfuerzos en todas las direcciones (X, Y, Z), en cuanto al modelo analítico se consideran únicamente los esfuerzos en las direcciones X y Y, puesto que en la normativa se desprecia el esfuerzo restante.

5.2. Comparación entre el modelo analítico y computacional: resorte

El análisis se lleva a cabo con la presión máxima, 837 038.38 Pa. Bajo este valor, la fuerza máxima que el resorte soporta es de 221 N, tomando en cuenta el área de trabajo. Una vez obtenida la fuerza y bajo las especificaciones de diseño de resortes helicoidales a compresión², el resorte tiene un diámetro externo de 1.6 cm, 5 espiras y un espesor 3.1 mm.

Tabla 11. Factor de seguridad del resorte para ambos modelos

RESORTE	Factor de seguridad (S.F)
Modelo Analítico	2.05
Modelo Computacional	1.74
Error	13%

Al analizar la Tabla 11 se determinó que para el modelo analítico el factor de seguridad es de 2.05 y para el computacional de 1.7. Esto genera un error del 13%. Como se observa el valor resultante del modelo computacional es menor, esto se debe a que el programa analiza todos los elementos e imprime como resultado todos los valores obtenidos, desde el menor hasta el mayor. A pesar de esto, el diseño es satisfactorio, pues según el libro², el valor recomendado para el factor de seguridad va de 1.7 a 2.2.

Por último se determinó que el resorte es diseñado para tener vida infinita y de esta manera lograr un desempeño correcto al momento de aplicar fuerza en el mismo. Como se observa en la Tabla 12, se determinó que el factor de seguridad a Fatiga (Metodo de Goodman)

² Shigley's Mechanical Engineering Design, capítulo 10.

es de 2.27. (ver ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES sección 9.3.11). Pese a que el diseño se lo realiza para vida infinita, el resorte debe ser reemplazado cada cierto tiempo; no obstante, el arma será capaz de realizar una gran cantidad de disparos previo al mantenimiento.

Tabla 12. Factor de seguridad a fatiga del resorte

Factor de Seguridad a Fatiga (Peened Spring - Método de Goodman)	2.27
---	------

5.3. Comparación entre el modelo analítico y computacional de la dinámica del fluido

Al analizar el comportamiento interno del fluido en la pistola se obtuvo que a una presión de entrada de 652 622 Pa, se obtienen cambios de presión considerables. Se observa que el aire entra en contacto con el dardo a una presión de 366 261 Pa, demostrando que el aire si pierde energía a lo largo del recorrido debido a la expansión, puesto que una de las suposiciones realizadas es que el aire se comporta como un fluido incompresible.

Tabla 13. Resultados del modelo computacional 4.2.1

Expansión del aire desde la cámara secundaria hasta el cañón	
Presión inicial	652 kPa
Aire entra en contacto con el dardo	366 kPa

Por otro lado, para la segunda simulación en donde el dardo se mueve desde el reposo dentro de la pistola y por todo el cañón, se corren dos escenarios, una con presión inicial de 652 622 Pa (Escenario A) y la otra 366 261 Pa (Escenario B). Se obtiene que la velocidad del aire en el punto de salida para el escenario A es de 96 m/s y para el escenario B es de 90 m/s.

Tabla 14: Resultados del modelo computacional 4.2.2.

Impulso del dardo por el cañón			
	Presión de contacto con el dardo (kPa)	Velocidad del aire en el punto de salida (m/s)	Velocidad del dardo (m/s)
Escenario A	652	96	68.3
Escenario B	366	90	53.5

Comparando la velocidad del aire obtenida en los escenarios A y B, y la velocidad del proyectil calculada, se puede observar cómo efectivamente el fluido va un 29% más rápido que el objeto. Se observa en la Tabla 13 que la velocidad del dardo a partir de los datos del escenario A es de 68.3 m/s y del escenario B es de 53.5 m/s.

5.4. Comparación entre el modelo analítico y computacional de la dinámica del dardo

En primer lugar, se observa los parámetros colocados para el correcto análisis de la dinámica del dardo. Se comparan dos tipos de masas: la primera de 10 gramos, la cual contiene 2.5 ml de líquido anestésico, y la segunda con una masa de 13g, la cual contiene 5 ml de líquido anestésico. Las dos masas fueron disparadas a una altura de 1.65 m y a una distancia de 15 m, ambas con una velocidad de impacto de 57.5 m/s.

Tabla 15. Resultado de la balística externa para ambos modelos

Diferencia de altura a 15 m (altura inicial 1.65 m; Velocidad de impacto de 57.5 m/s)	Masa	Presión inicial de disparo	Velocidad inicial del dardo	Modelo Analítico (Ángulo de 0°)	Modelo Computacional (Ángulo de 0°)	Modelo Computacional (Ángulo de 1°)
	0.01 kg	570 kPa	62.81 m/s	28 cm	30 cm	3.6 cm
	0.013 kg	711 kPa	61.54 m/s	33 cm	30 cm	4.5 cm

En la Tabla 15 se observa que para una masa de 10 g la presión de disparo debe ser de 570 kPa, resultando en una velocidad de salida de 62.81 m/s. Al disparar con un ángulo de 0° , tanto en el modelo analítico como el computacional, se obtuvo que la diferencia de altura es superior a la deseada. Dado que el error es grande se procede a añadir un ángulo de tiro, por lo que se dispara con un ángulo de 1° en el modelo computacional, obteniendo una caída de 3.6 cm. Al igual que con la masa de 10 g, se analiza la masa de 13 g. En esta se observa una diferencia de altura, para un ángulo de 0° , de 33 y 30 cm en el modelo analítico y computacional, respectivamente. Del mismo modo se dispara con un ángulo de 1° y se obtiene una caída de 4.5 cm.

5.5. Análisis de los resultados obtenidos en base a las necesidades del cliente

En la Tabla 16 se comparan los resultados obtenidos con las especificaciones técnicas planteadas en la sección 2.

Tabla 16: Comparación de los resultados obtenidos con las especificaciones técnicas

Análisis de los resultados en base a las necesidades indentificadas. Especificación Técnica	Resultados obtenidos
El error máximo en la diferencia de altura entre el disparo y el blanco sea de ± 5 cm	Cálculos: Para una distancia de 20 m la diferencia de altura es de 19 cm. Simulación: Para una distancia de 20 m la diferencia de altura es de 5 cm.
El rango de disparo sea de 5 m a 20 m	Se tiene una tabla para distintas velocidad y distancias de tiro. La distancia mínima es de 5 m y la máxima es de 20 m.
El rango de velocidades para un dardo de masa ligera es de 28 m/s a 100 m/s	Cálculos: Para 20 m se tiene una velocidad de 107 m/s. Simulación: Para 20 m se tiene una velocidad de 57.5 m/s para las condiciones especificadas (todo esto es explicado en la sección de simulaciones).
El factor de seguridad sea de 3.5	Cálculos: El factor de seguridad obtenido para el tanque de presión es de 3.62. Simulación: El factor de seguridad del obtenido por métodos numéricos es de 3.24.

Algunas investigaciones concuerdan que la velocidad de impacto es variable y oscila entre los 28 m/s y 100 m/s, por lo que se realizó una pistola que cumpla con estos parámetros. Los valores obtenidos en la sección 3 superan este rango debido a la presión utilizada. Consecuentemente se volvió a realizar los cálculos con la velocidad de impacto deseada, la cual fue de 57.5 m/s para 20 m y se obtuvo la presión máxima de trabajo por lo cual se modificó el resorte. Por último, al manejar pistolas de aire comprimido, se debe tomar en cuenta que es un artefacto peligroso por lo que es importante cumplir la norma *ASME BPVC* ya que esta garantiza un diseño seguro del tanque.

6. TRABAJO FUTURO

Los pasos siguientes abarcan distintas áreas para mejorar el proyecto presentado. Primero, se tiene que trabajar en el diseño de distintos cañones para manejar más tamaños de dardos. Como se observó, se trabaja solo un tamaño de dardo (ver ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DEL DARDO sección 9.6.4), considerando dos distintos volúmenes del fluido interno (los pesos fueron obtenidos con agua) que corresponden a los valores de 2.5 mL y de 5 mL. De esta manera, trabajar con distintos tamaños de dardos permitirá tener un rango más amplio para variar el volumen de líquido interno. Esto es un punto importante porque proyectiles muy pesados pueden suponer velocidades de salida muy bajas, y eso ocasiona que tengan niveles bajo de energía cinética. Por eso, es necesario determinar el balance masa-velocidad para optimizar el rendimiento.

Por otro lado, como se observó en los resultados obtenidos en la sección 4.3, se tiene que trabajar con ángulos de tiro muy pequeños que resulta imposible medirlos con el ojo humano. Por esta razón, se tiene que agregar un sistema para medir el ángulo de tiro que sea sensible y adaptado a las necesidades presentadas. Por lo general, las pistolas de caza y anestésicas profesionales incluyen un medidor de ángulo para PCP. Este aparato sirve para medir el ángulo de tiro deseado; sin embargo, trabaja con ángulos mayores a 5° . Por eso, la idea sería adaptar un sistema similar que cumpla con las necesidades del proyecto y sea diseñado para cumplir el rango 1° a 5° . De la misma manera, se puede agregar un sistema de mira para asegurar la precisión del tiro y posteriormente, realizar sus respectivas pruebas.

Otro punto importante, es trabajar con distintos diseños de resorte, ya que en el presente caso se trabaja solo con uno que fue diseñado para soportar aproximadamente 840 kPa. El objetivo de diseñar el resorte para el regulador de presión de la cámara secundaria es que este sea más sensible al ajuste (con un coeficiente de rigidez menor que el resorte original).

A pesar de que se realizan las simulaciones correspondientes para validar su diseño, la única manera de comprobar su sensibilidad es mediante pruebas físicas con el resorte construido. Por otro lado, la limitación de que el resorte soporte 840 kPa ocasiona tener velocidades máximas de disparo menores a 100 m/s medidas en el extremo del cañón (*muzzle speed*). Entonces, otra solución para aumentar la precisión del arma es trabajar con velocidades mayores.

Adicionalmente, para el presente trabajo se tiene un solo tipo de estabilizador. Como se plantea la opción de trabajar con un estabilizador impreso en 3D, se propone probar distintos diseños de estabilizadores para observar si existen cambios significativos. Esto puede permitir obtener distintos resultados en la dinámica del dardo.

Finalmente, una vez que se tenga el prototipo construido, se tiene que realizar pruebas de precisión y fuerza utilizando un mecanismo electrónico y mecánico armado con celdas de carga y una placa de apoyo para poder obtener la fuerza de impacto de manera experimental. De esta manera, se podrán monitorear factores externos como el viento, la humedad y el cambio de temperatura, que para este proyecto no fueron considerados.

Se considera como recomendaciones, no alterar ni dañar los accesorios que sean parte de la Pistola Eclipse ETEK 4.

7. CONCLUSIONES

- A partir de la sección 3.3 se concluye que la presión inicial utilizada es demasiado alta para solventar las necesidades definidas. Por esta razón, se realiza el diseño del resorte del regulador de presión que permite trabajar en un rango de presiones desde 28 hasta 121 psi.
- Se encuentra que para el tanque de almacenamiento, el espesor mínimo del material debe ser de 10 mm para obtener de manera analítica un factor de seguridad de 3.62 y de esta manera cumplir con la norma *ASME BPVC* tomando en cuenta el acero utilizado.
- El diámetro del resorte es de 1.6 cm con 5 espiras y un espesor de 3.1 mm, permitiendo que la fuerza máxima a la que el resorte opere sea de 221 N, la cual corresponde a una presión de 121 psi.
- Se obtienen discrepancias en los resultados del modelo analítico y computacional del tanque debido a los esfuerzos actuantes asumidos. El error generado por esta suposición es del 11% para el factor de seguridad y del 40 % para el esfuerzo de Von Mises.
- El diseño del resorte soporta cargas dinámicas, permitiendo que su diseño sea apto para trabajar a fatiga. El factor de seguridad obtenido para vida infinita por el método de Goodman es de 2.27, asegurando que el resorte soporte la carga necesaria para varios disparos.
- Se observa una pérdida de energía del aire desde la cámara secundaria hasta el final del ánima del cañón. Por esta razón, la presión del aire cuando hace contacto con el dardo es de 367 kPa lo que genera que la velocidad del hocico sea menor a la teórica.

- Para contrarrestar el efecto de la caída del proyectil cuando el arma esta paralela al suelo, se utilizaron ángulos de tiro positivos para estabilizar la trayectoria y así cumplir el criterio establecido de ± 5 cm en la diferencia de altura.
- Se concluye que la masa del proyectil influye en los resultados obtenidos. Como se observó, un aumento en la masa del 30 % genera que la presión necesaria para obtener una velocidad de impacto de 57.5 m/s sea mayor en un 19%. Pese a esto, si ambos proyectiles son disparados a la misma velocidad se obtiene que el proyectil más pesado tiene mejor capacidad de mantener su velocidad generando que la trayectoria sea más estable.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aceros Inoxidables Austeníticos. (s/f). *General de Aceros S.A.* Recuperado el 2 de mayo del 2020 de <https://www.cga.com.co/images/document/ficha-304-304L.pdf>
- Aluminum 7075-T6. (2001). *ASM Aerospace Specification Metals Inc.* Recuperado el 1 de mayo del 2020 de <http://asm.matweb.com/search/GetReference.asp?bassnum=MA7075T6>
- ASTM A230 / A230M-19. (2019). Standard Specification for Steel Wire, Carbon Valve Spring Quality. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. Recuperado el 2 de mayo del 2020 de <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?A230A230M-19>
- ASTM A401 / A401M-18. (2018). Standard Specification for Steel Wire, Chromium-Silicon Alloy. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019. Recuperado el 2 de mayo del 2020 de <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?A401A401M-18>
- ASTM F1776-19. (2019). *Standard Specification for Eye Protective Devices for Paintball sport.* ASTM international. Recuperado el 27 de enero de 2019 de: <https://www.astm.org/Standards/F1776.htm>
- ASTM F2574. (2019). *Standard Specification for 6mm Projectiles Used with Airsoft Guns.* ASTM international. Recuperado el 27 de enero de 2019 de: <https://www.astm.org/Standards/F2679.htm>
- Beef Quality Assurance. (2008). *BQA Advisory statement: Pneumatic darts.* Recuperado el 29 de enero del 2020 de https://www.bqa.org/Media/BQA/Docs/bqa_advisory_statement_on_the_use_of_pneumatic_dart_guns.pdf
- Budynas, R. Nisbett, J. (2011). Mechanical Springs. *Shigley's Mechanical Engineering Design.* (10 ed.). (pp. 517 – 528). McGrawhill.
- Bush, M. (1992). *Remote Drug Delivery.* Journal of Zoo and Wildlife Medicine. Recuperado el 29 de enero del 2020 de: <https://www.jstor.org/stable/20095205>
- Cattet, M., et al. (2006). *Evaluation of the Potential for Injury with Remote Drug-Delivery Systems.* Recuperado el 12 de marzo del 2020 de http://www2.cwhc-rcsf.ca/publications/RDDS_Injury-Cattet_et_al_WSB.pdf
- Chiarawongse, P., Chirathivat, A. (2008). *Paintball velocity as a function of distance traveled.* Recuperado el 2 de mayo del 2020 de

- https://www.researchgate.net/publication/49586075_Paintball_velocity_as_a_function_of_distance_traveled
- Custom Products Inline Reg. (2004). *Custom Products Inline Reg.* Recuperado el 1 de mayo del 2020 de <http://www.warpig.com/paintball/technical/regulators/cpinline/index.shtml>
- Denny, M. (2011). The Internal Ballistics of an Air Gun. *The Physics Teacher*. 49. (pp. 81-83). 10.1119/1.3543577.
- descripción de una técnica de implante para especies de pequeña y mediana talla.* Universidad de Chile. Recuperado el 29 de enero del 2020 de https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-65382013000100004
- Díaz, F. (2018). Recipientes a presión. UNAM. Recuperado el 2 de marzo del 2020 de http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m5/Recipientes%20a%20presion.pdf
- Ecuador está en el tercer en el tercer puesto de los países con menor altura de Sudamérica. (27 de Julio de 2016). *El Tiempo*. Recuperado de: shorturl.at/jrBSX
- Faraz, Mohd. (2018). Study of projectile motion with air resistance. Recuperado el 25 de abril del 2020 de https://www.researchgate.net/publication/329339455_Study_of_projectile_motion_with_air_resistance
- Jessup, D. (2006). *Reducing Capture – Related Mortality and dart Injury*. Wiley.
- Lozano, J (2015). *Estudio y Modelado de la Unidad de Potencia de un Rifle PCP* (tesis de pregrado). Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España.
- Medidor de ángulo para PCP. (s/f). *Medidor de ángulo. TCP*. Recuperado el 1 de mayo del 2020 de http://www.todocazaypesca.cl/index.php?id_product=132&controller=product&id_lang=4
- Mendez, C. (2013). *Utilización de marcas electrónicas "PIT tags" en Liolaemus y*
- Moria, H. (2015). *Experimental Study of Aerodynamic Behavior of Stretchable Sport Fabrics - Scientific Figure on ResearchGate*. Recuperado el 7 de mayo del 2020 de https://www.researchgate.net/figure/Drag-coefficient-C-D-of-blunt-nose-upper-part-and-rounded-nose-lower-part_fig2_275887347

- Munson, B. R., Gerhart, P. M., Gerhart, A. L., Hochstein, J. I., Young, D. F., & Okiishi, T. H. (2016). Flow Over Immersed Bodies. *Munson, Young, and Okiishi's Fundamentals of fluid mechanics*. (8 ed.) (pp. 524). Wiley.
- NRA – Range Manual. (2010). *Range Distances – All shooting Disciplines*. Recuperado el 29 de enero del 2020 de <https://www.dlgsc.wa.gov.au/sport-and-recreation/sports-dimensions-guide/shooting>
Recuperado el 27 de enero del 2020 de <https://www.jstor.org/stable/3784207>
- Resortes de Hidalgo. (2017). Ocho pasos para la fabricación de resortes. Recuperado el 25 de marzo del 2020 de <https://bit.ly/2xwHXf7>
- Rifles de CO2. (2016). *Rifles de CO2. Daninject Dart Guns*. Recuperado el 2 de mayo del 2020 de <https://daninjectdartguns.com/es/categoria-producto/rifles-de-co2/>
- Trejo, Leonor & Méndez-Sánchez, Arturo & Ponce, Julia. (2010). Velocidad terminal de una esfera descendente y la viscosidad de fluidos: diferencia entre fluidos newtonianos y no newtonianos. *Latin-American Journal of Physics Education*

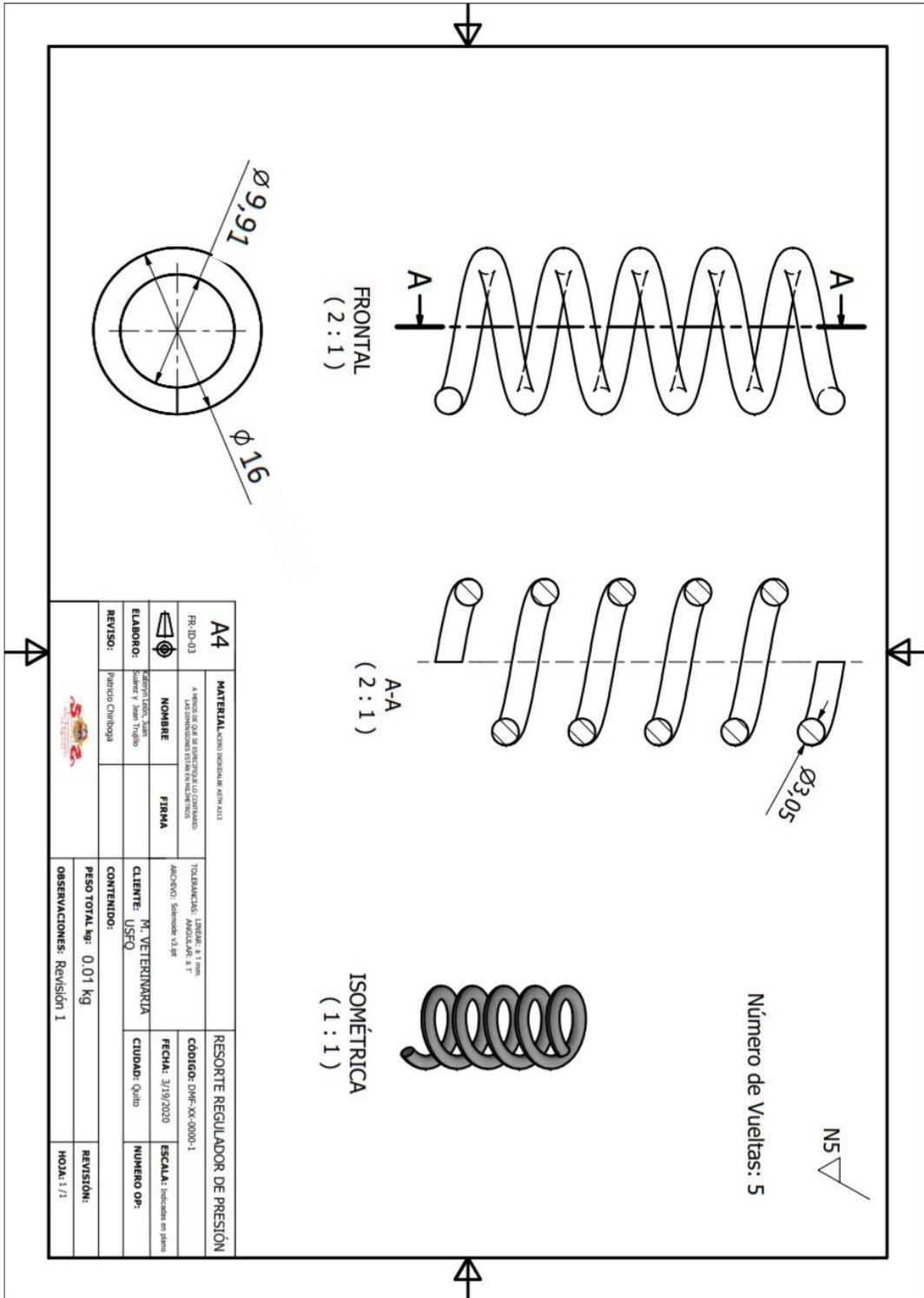
9. ANEXOS

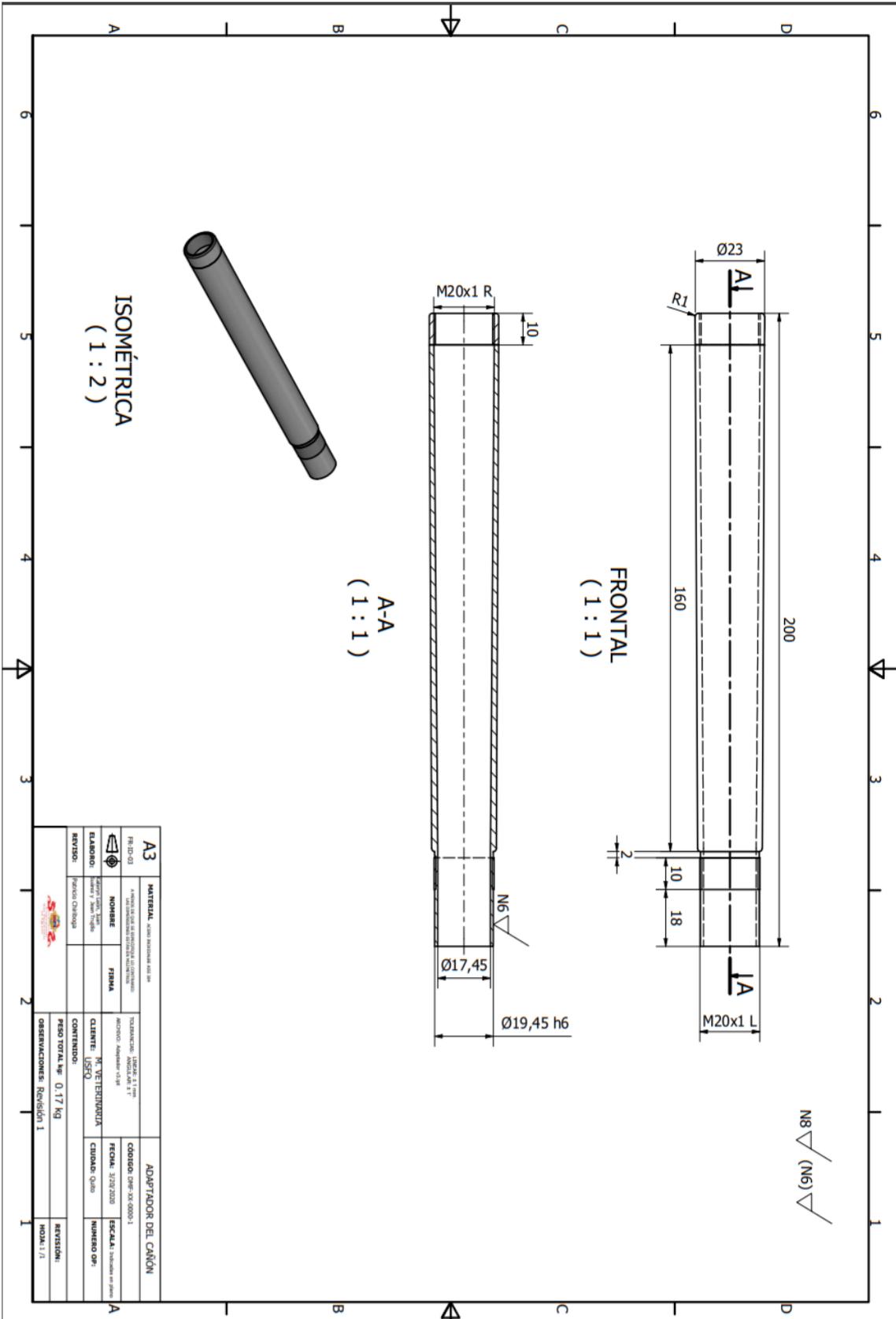
9.1. ANEXO A: ESTÁNDARES INGENIERILES

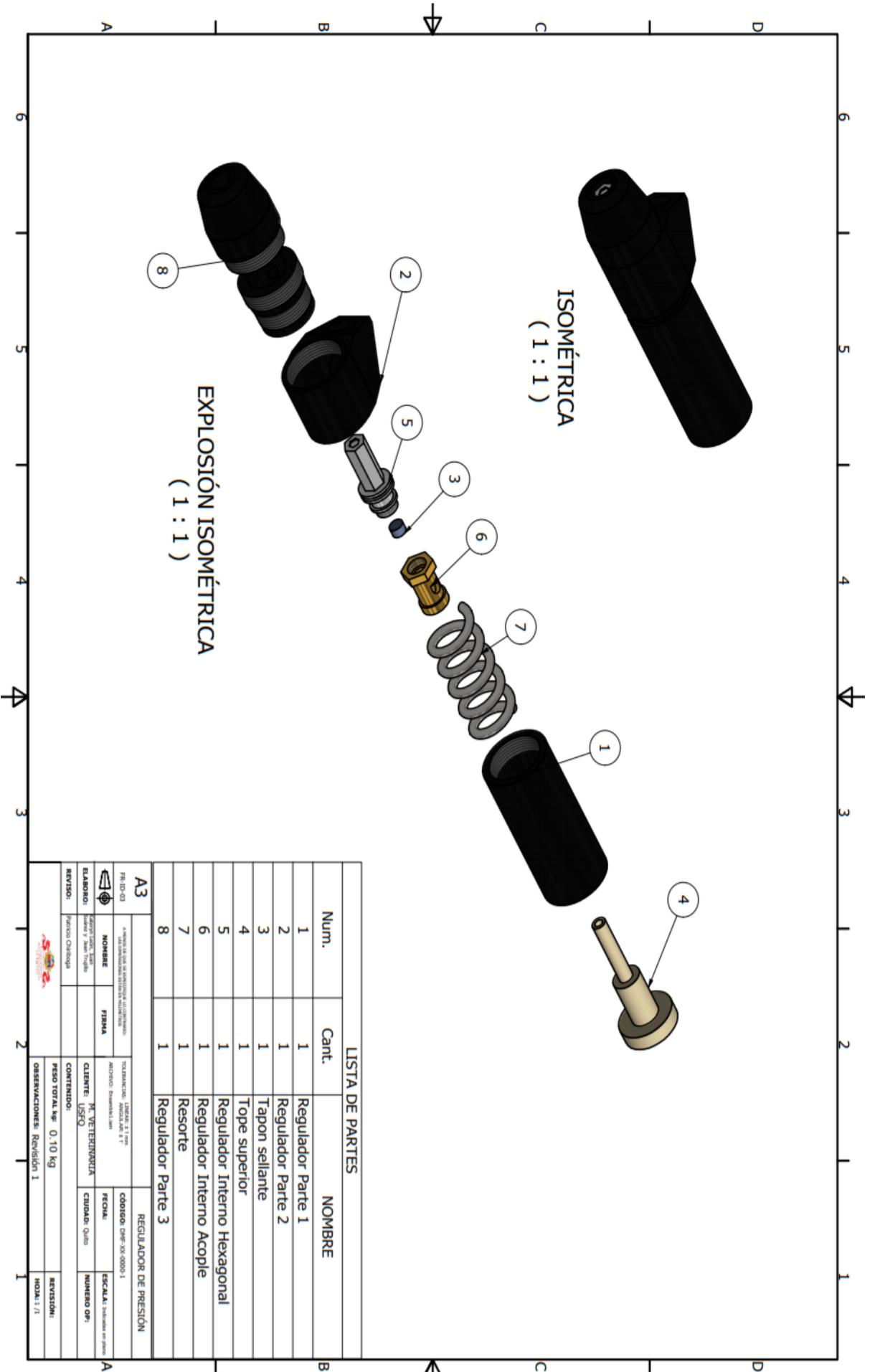
Tabla A - 1: Estándares y normas utilizadas para el diseño de la pistola para dardos anestésicos

Estándar	Importancia
1. AD 2000	Especificaciones de seguridad para equipos que funcionan a presión.
2. <i>ASTM F1776</i>	Especificaciones técnicas que deben aprobar los equipos de seguridad para el uso del equipo.
3. <i>ASTM F2574</i>	Norma de seguridad para armas de aire de bajo de nivel que disparan proyectiles con líquido.
4. NRA – Range Manual.	Normativas de seguridad de disparo de diferentes tipos de pistolas y rifles de aire, nitrógeno y CO ₂ .
5. Evaluation of the Potential for Injury with Remote Drug-Delivery Systems	Investigación realizada que mide velocidad, tiempo y distancia para distintos disparos realizados con un dardo de 12.5 mm de diámetro.
6. Beef Quality Assurance	Normativas para el uso de dardos de carga a presión.
7. <i>ASTM A401</i>	Especificaciones utilizadas para resortes helicoidales de compresión.
8. <i>ASTM A230</i>	Especificaciones estándar para alambre de acero.
9. <i>ASME BPVC</i>	Normativa para el diseño de tanques a presión sin empernar.

9.2. ANEXO B: PLANOS DE MANUFACTURA







LISTA DE PARTES

Num.	Cant.	NOMBRE
1	1	Regulador Parte 1
2	1	Regulador Parte 2
3	1	Tapon sellante
4	1	Tope superior
5	1	Regulador Interno Hexagonal
6	1	Regulador Interno Acople
7	1	Resorte
8	1	Regulador Parte 3

A3		REGULADOR DE PRESIÓN	
<small> PN-BO-03 4. Aprobado por el Comité de Seguridad de Gas de Chile (CARGA MÁXIMA DE TRABAJO DE 100 kg) </small>	<small> TOLERANCIAS: Tamaño: ± 0.1 mm ANGULO: 45° </small>	<small> CÓDIGO: DPW-003-0000-1 </small>	<small> ESCALA: 1:1 </small>
<small> ELABORADO: </small>	<small> NOMBRE: </small>	<small> FECHA: </small>	<small> NÚMERO OP: </small>
<small> REVISOR: </small>	<small> FIRMA: </small>	<small> CLIENTE: </small>	<small> CUANDO: </small>
<small> REVISIÓN: </small>	<small> CONTENIDO: </small>	<small> PESO TOTAL kg: 0.10 kg </small>	<small> REVISIÓN: </small>
<small> OBSERVACIONES: Revisión 1 </small>			<small> HOJA: 1 / 1 </small>

9.3. ANEXO C: RESOLUCIÓN DE ECUACIONES

9.3.1. Solución ecuación 3.6

$$P_t V_t = P_o V_o$$

$$P_t = P_o \left(\frac{V_o}{V_t} \right)$$

9.3.2. Solución de la ecuación 3.11

$$u = v_{(0)} + A x_{(t)}$$

$$\frac{du}{dx} = A$$

$$P_o * V_o * A \int_{V_{(0)}}^{V_{(0)} + A * L} \frac{1}{A * u} du - F_r * L = \frac{1}{2} m v_{(L)}^2$$

$$P_o * V_o * \ln \left(1 + \frac{A * L}{V_{(0)}} \right) - F_r * x = \frac{1}{2} m v_{(x)}^2$$

9.3.3. Solución de la ecuación 3.12

$$P_o * V_o * \ln \left(1 + \frac{A * L}{V_{(0)}} \right) - F_r * x = \frac{1}{2} m v_{(x)}^2$$

$$v_{(x)}^2 = \frac{2}{m} \times \left(P_o V_o \ln \left(1 + \frac{AL}{V_o} \right) - F_r * x \right)$$

$$v_{(x)} = \sqrt{\frac{2}{m} \left(P_o V_o \ln \left(1 + \frac{AL}{V_o} \right) - F_r * x \right)}$$

9.3.4. Solución de la ecuación 3.16

$$\sum F_y = -W - F_D = 0$$

$$W = F_D$$

$$m_d \cdot g = \frac{1}{2} \rho_{aire} C_D V_t^2 A_{dardo}$$

$$V_t = \sqrt{\frac{2 * m_d * g}{Cd * \rho_{aire} * A_d}}$$

9.3.5. Solución de la ecuación 3.17

$$\sum F_x = -F_D$$

$$\sum F_x = -F_D = m \cdot a(t)$$

$$m \cdot a(t) = \frac{1}{2} \rho_{aire} C_D V_t^2 A_{dardo}$$

$$a(t) = \frac{\rho_{aire} C_D V_t^2 A_{dardo}}{2m}$$

9.3.6. Solución de la ecuación 3.25

$$x(t) = \frac{v_t^2}{g} \ln \left(\frac{v_t^2 + g \cdot v_0 \cdot t}{v_t^2} \right)$$

$$\frac{gx(t)}{v_t^2} = \ln \left(\frac{v_t^2 + gv_0 t}{v_t^2} \right)$$

$$e^{\frac{gx(t)}{v_t^2}} = \frac{v_t^2 + gv_0 t}{v_t^2}$$

$$t = \frac{v_t^2 \left(e^{\frac{gx(t)}{v_t^2}} - 1 \right)}{g \cdot v_0}$$

9.3.7. Solución de la ecuación 3.26

$$v(t) = \frac{v_t^2 \cdot v_0}{v_t^2 + g \cdot v_0 \cdot t}$$

$$v_t^2 + gv_0 t = \frac{v_t^2 v_0}{v(t)}$$

$$t = \frac{\left(\frac{v_t^2 v_0}{v(t)} - v_t^2 \right)}{gv_0}$$

$$t = \frac{v_t^2}{g \cdot v_0} \left(\frac{v_0}{v(t)} - 1 \right)$$

9.3.8. Solución de la ecuación 3.27

$$\frac{v_t^2 \left(e^{\frac{g \cdot x(t)}{v_t^2}} - 1 \right)}{g \cdot v_0} = \frac{v_t^2}{g \cdot v_0} \left(\frac{v_0}{v(t)} - 1 \right)$$

$$e^{\frac{g \cdot x(t)}{v_t^2}} - 1 = \frac{v_0}{v(t)} - 1$$

$$e^{\frac{g \cdot x(t)}{v_t^2}} = \frac{v_0}{v(t)}$$

$$v_0 = v(t) \cdot e^{\frac{g \cdot x(t)}{v_t^2}}$$

9.3.9. Solución de la ecuación 3.28

$$v_{(L)} = \sqrt{\frac{2}{m} \left[P_0 \cdot V_0 \cdot \ln \left(1 + \frac{A \cdot L}{V_{(0)}} \right) - F_r \cdot L \right]}$$

$$\frac{v_{(L)}^2 m}{2} = P_0 \cdot V_0 \cdot \ln \left(1 + \frac{A \cdot L}{V_{(0)}} \right) - F_r \cdot L$$

$$\frac{v_{(L)}^2 m}{2} + F_r \cdot L = P_0 \cdot V_0 \cdot \ln \left(1 + \frac{A \cdot L}{V_{(0)}} \right)$$

$$P_0 = \frac{\frac{v_{(L)}^2 m}{2} + F_r \cdot L}{V_0 \ln \left(1 + \frac{A \cdot L}{V_{(0)}} \right)}$$

9.3.10. Solución de la ecuación 3.32

$$\int_{v_0}^{v(t)} \frac{1}{v^2} \cdot dv(t) = \int_0^t -\frac{g}{v_t^2} \cdot dt$$

$$\frac{1}{v_0} - \frac{1}{v(t)} = -\frac{gt}{v_t^2}$$

$$\frac{1}{v(t)} = \frac{gt}{v_t^2} + \frac{1}{v_0}$$

$$v_x(t) = \frac{v_t^2 \cdot v_{0x}}{v_t^2 + g \cdot v_{0x} \cdot t}$$

9.3.11. Factor de seguridad del resorte (FATIGA).

$$F_a = \frac{F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n}}{2}$$

$$F_{m\acute{a}x} = 221 \text{ N y } F_{m\acute{i}n} = 0 \text{ N}$$

$$F_a = F_m = 110.5 \text{ N}$$

$$\tau_a = \frac{K_b 8F_a D}{\pi d^3}$$

$$\tau_a = \tau_m = 201.92 \text{ Mpa}$$

$$S_{ut} = \frac{A}{d^m} = 1540.37 \text{ MPa}$$

A y m de los datos [F] de la sección 9.4.4.

$$S_{su} = 0.67S_{ut} = 1032.05 \text{ MPa}$$

$$S_{se} = \frac{S_{sa}}{1 - \left(\frac{S_{sm}}{S_{su}}\right)} = 824.73 \text{ MPa}$$

S_{sa} y S_{sm} para un resorte "peened".

$$S_{sa} = \frac{rS_{se}S_{su}}{rS_{su} + S_{se}} = 458.41 \text{ MPa}$$

$$\eta_f = \frac{S_{sa}}{\tau_a}$$

$$\eta_f = 2.27$$

9.3.12. Solución de la ecuación 4.2

$$\text{Si } a(t) = \dot{V}(t)$$

$$\frac{dV(t)}{dt} = a(t)$$

Ley de Newton:

$$\sum F_y = F_{net}$$

$$F_{net} = -W - D$$

$$F_{net} = -m \cdot g - \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot C_D \cdot V_{(t)}^2 \cdot A_d = m \cdot a(t)$$

$$-g - \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho_{aire}}{m_{dardo}} \cdot C_D \cdot V_{(t)}^2 \cdot A_d = \frac{dV(t)}{dt}$$

$$-g - \frac{g \cdot V_{(t)}^2}{V_t^2} = \frac{dV(t)}{dt}$$

$$-g \left(1 + \frac{V_{(t)}^2}{V_t^2} \right) = \frac{dV(t)}{dt}$$

$$\int_0^t -g dt = V_t^2 \int_{V(0)}^{V(t)} \frac{1}{(V_t^2 + V_{(t)}^2)} dv(t)$$

Se resuelve con una integral trigonométrica inversa:

$$\int \frac{du}{a^2 + u^2} = \frac{1}{a} \tan^{-1} \frac{u}{a} + C \quad a \neq 0$$

$$\int_0^t -g dt = V_t^2 \left[\left(\frac{1}{V_t} \tan^{-1} \left(\frac{V(t)}{V_t} \right) \right) - \left(\frac{1}{V_t} \tan^{-1} \left(\frac{V_0}{V_t} \right) \right) \right]$$

$$-gt = V_t \left[\tan^{-1} \left(\frac{V(t)}{V_t} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{V_0}{V_t} \right) \right]$$

$$-\frac{gt}{V_t} = \left[\tan^{-1} \left(\frac{V(t)}{V_t} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{V_0}{V_t} \right) \right]$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{V(t)}{V_t} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{V_{0y}}{V_t} \right) - \frac{gt}{V_t}$$

Función trigonométrica:

$$\tan(a - b) = \frac{(\tan(a) - \tan(b))}{(1 + \tan(a) * \tan(b))}$$

$$a - b = \tan^{-1}\left(\frac{V_{(t)}}{V_t}\right) \rightarrow \begin{cases} a = \tan^{-1}\left(\frac{V_{0y}}{V_t}\right) \\ b = -\frac{gt}{V_t} \end{cases}$$

$$\frac{V_{(t)}}{V_t} = \frac{\left(\frac{V_{0y}}{V_t} - \tan\left(\frac{gt}{V_t}\right)\right)}{\left(1 + \left(\frac{V_{0y}}{V_t}\right) \times \tan\left(-\frac{gt}{V_t}\right)\right)}$$

$$\frac{V_{y(t)}}{V_t} = \frac{V_{0y} - V_t \tan\left(\frac{gt}{V_t}\right)}{V_t + V_{0y} \tan\left(\frac{gt}{V_t}\right)}$$

$$V_{y(t)} = \frac{V_t \left(V_{0y} - V_t \tan\left(\frac{gt}{V_t}\right)\right)}{V_t + V_{0y} \tan\left(\frac{gt}{V_t}\right)}$$

9.4. ANEXO D: DATOS INICIALES

9.4.1. Datos iniciales para el análisis de esfuerzos en el tanque

DATOS [A]
<ul style="list-style-type: none"> - Material del tanque principal: Acero <i>ASTM A516 Gr 70</i> - Tensile strength yield = 260MPa/ 38 KSI - Presión máxima del tanque: $P_0 = 3000 \text{ psi} = 2.06 \times 10^7 \text{ Pa}$ - Factor de seguridad (S.F) = 3.5 (Norma <i>ASME BPVC</i>) - Eficiencia de junta = 0.9 (Soldado) - Diámetro externo del tanque (f) = 9cm = 0.09m - Espesor = 10mm = $10 \times 10^{-3} \text{ m}$

9.4.2. Datos iniciales para la balística interna

DATOS [B]
<ul style="list-style-type: none"> - $m = 10 \text{ g}$ (masa del dardo con 2.5 mL de agua) - $P_0 = 2.1 \times 10^6 \text{ Pa}$ (presión inicial del reservorio secundario) - $V_0 = 1.2433 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ (volumen inicial del reservorio secundario) - $L = 0.6 \text{ m}$ (distancia del cañón modificado) - $A_c = \frac{\pi}{4} (20 \times 10^{-3})^2 = 3.1416 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ (área transversal del cañón con 20 mm de diámetro interno) - $u_D = 0.17$ (Coeficiente de rozamiento entre Polietileno y acero $u_s = 0.20$)

9.4.3. Datos iniciales para la balística externa

DATOS [C]
$\rho_o = \rho_{aire} = 1.225 \frac{kg}{m^3}$
$v_o = 120.54 \frac{m}{s}$ (La velocidad del dardo con respecto al cañón, se asume que es la misma del dardo)
$l = 0.13 m$ (longitud del dardo)
$u = 1.85 \times 10^{-5} \frac{N s}{m^2}$ (Se la obtiene de la Tabla B.4 a 25°C P. 779)
$A_{dardo} = \frac{\pi}{4} (0.012)^2 = 1.13097 \times 10^{-4} m^2$

9.4.4. Datos iniciales para el diseño del resorte

DATOS [D]
- $x(t) = 20 m$
- $v_t = 40.818 \frac{m}{s^2}$
- $v(t) = 67.62 \frac{m}{s^2}$
- $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$

DATOS [E]
- $v(L) = 76.10 m/s$
- $F_r = 0.0166 N$
- $L = 0.4 m$
- $Ac = 3.1416 \times 10^{-4} m^2$

DATOS [F]
- $\varepsilon = 28 \text{ Mpsi}$
- $\sigma = 10 \text{ Mpsi}$
- $m = 0.263$
- $A = 128 \text{ kpsi} * \text{in}^m$

9.5. ANEXO E: MODELO COMPUTACIONAL DEL ANÁLISIS DE ESFUERZOS

9.5.1. Datos iniciales para el análisis de esfuerzos del tanque

DATOS [F] – TANQUE
- Material: Acero <i>ASTM</i> A516 Gr 70
- Tensile strength yield = 260MPa/ 38 KSI
- Presión máxima: $P_o = 3000 \text{ psi} = 2.06 \times 10^7 \text{ Pa}$
- Factor de seguridad (S.F) = 3.5 (Norma <i>ASME</i> BPVC)
- Eficiencia de junta = 0.9 (Soldadura)
- Diámetro externo del tanque (f) = 9 cm = 0.09m
- Espesor = 10mm = $10 \times 10^{-3} \text{ m}$
- Peso (sin aire): 1.2 kg

9.5.2. Datos iniciales para el análisis de esfuerzos del resorte

DATOS – RESORTE [G]	
-	Material del resorte: ACERO INOXIDALBE ASTM A313
-	Tensile strength yield = 1155MPa
-	Fuerza aplicada en el resorte: F = 221N
-	Diámetro del intermedio del resorte D=16 mm
-	Diámetro del alambre: 3.05 mm
-	Peso: 0.01Kg
-	Vueltas: 5
-	Resorte cara plana a la izquierda

9.5.3. Tablas de impacto para tres distintas fuerzas calculadas.

Tabla E - 1: Resultados de la simulación obtenidos a tres distintas fuerzas calculadas a una distancia de 5 metros.

Para x = 5 metros								
Fuerza de impacto en el animal [N]		Velocidad de salida del cañón [m/s]	Presión inicial en la cámara secundaria (Psi)	Presión inicial en la cámara secundaria (kPa)	Fuerza en el resorte [F]	Factor de seguridad	Stress max Von Mises [MPa]	Desplazamiento en el eje Y [mm]
Máx.	73.63	75.827	120.56	831.262	219.45	1.75	825.3	5.796
Med	58.80	60.550	76.89	530.163	139.96	2.75	526.3	3.696
Mín.	35.80	36.840	28.49	196.444	51.86	7.41	195	1.37

Tabla E - 2: Resultados de la simulación obtenidos a tres distintas fuerzas calculadas a una distancia de 10 metros.

Para x = 10 metros								
Fuerza de impacto en el animal [N]		Velocidad de salida del cañón [m/s]	Presión inicial en la cámara secundaria (Psi)	Presión inicial en la cámara secundaria (kPa)	Fuerza en el resorte [F]	Factor de seguridad	Stress max Von Mises [MPa]	Desplazamiento en el eje Y [mm]
Máx.	71.65	75.988	121.08	834.796	220.39	1.74	828.8	5.821
Med	60.15	63.781	85.31	588.215	155.29	2.48	584	4.101
Mín.	36.68	38.80	31.61	217.943	57.54	6.68	216.4	1.52

Tabla E - 3: Resultados de la simulación obtenidos a tres distintas fuerzas calculadas a una distancia de 15 metros.

Para x = 15 metros								
Fuerza de impacto en el animal [N]		Velocidad de salida del cañón [m/s]	Presión inicial en la cámara secundaria (Psi)	Presión inicial en la cámara secundaria (kPa)	Fuerza en el resorte [F]	Factor de seguridad	Stress max Von Mises [MPa]	Desplazamiento en el eje Y [mm]
Máx.	69.56	75.95	120.96	833.974	220.17	1.746	828	5.815
Med	61.547	67.18	94.66	652.623	172.29	2.23	647.9	4.55
Mín.	37.61	40.88	35.07	241.806	63.84	6.02	240.1	1.686

9.6. ANEXO F: MODELO COMPUTACIONAL DE LA DINÁMICA DE FLUIDO.

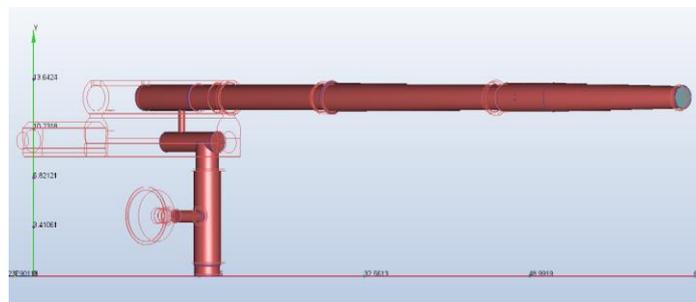
9.6.1. Datos iniciales para la simulación de la expansión del aire

DATOS INICIALES [H] – EXPANSIÓN DEL AIRE	
-	Material:
○	Pistola: Aluminio endurecido.
○	Acople de manómetro: Acero inoxidable.
-	Presión inicial [Pa]: 652622
-	Geometría: varía en cada parte de la pistola, principalmente cilindros.
-	Condiciones iniciales: velocidad inicial $0 \left[\frac{m}{s} \right]$
-	Peso [kg]: 0.01

9.6.2. Modelo utilizado para la expansión del aire.



a)



b)

Figura F - 1: a) Modelo CAD utilizado para la expansión del aire b) Volumen interno generado para el análisis CFD

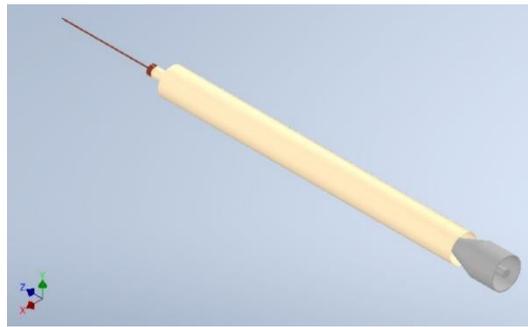
9.6.3. Datos iniciales para la simulación del impulso del dardo

DATOS INICIALES: Volumen del Dardo y Volumen del Aire [I]
<ul style="list-style-type: none"> - Material del Objeto (Inventor): <ul style="list-style-type: none"> ○ Estabilizador: Caucho ○ Contenedor: Polietileno (densidad alta) ○ Aguja: acero inoxidable - Material del Objeto (CFD): <ul style="list-style-type: none"> ○ Volumen generado por el <i>Surface Wrap</i>: Acrílico - Peso del objeto interno [kg] = 0.003 - Material del Volumen Externo: Aire. Propiedades a 26.89°C. Fluido compresible - Geometría del volumen externo (longitud): <ul style="list-style-type: none"> ○ X: 0.1533 m ○ Y: 0.1533 m ○ Z: 0.70 m (se considera el largo del cañón 0.6 m + el espacio aproximado dentro de la cavidad interna de la pistola)

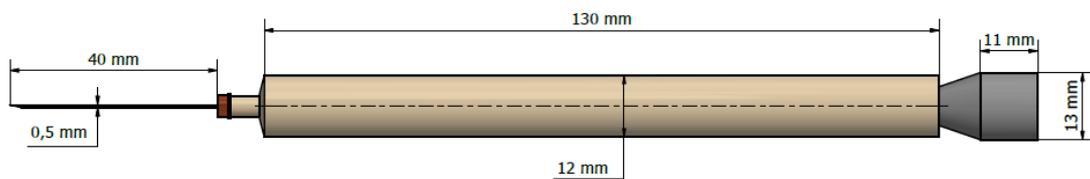
DATOS SIMULACIÓN A – ESCENARIO 1 [J]
<ul style="list-style-type: none"> - Condiciones de Borde: <ul style="list-style-type: none"> ○ Presión Estática inicial [Pa] = 652 622 ○ Presión Estática final [Pa] = 0 (equilibrio con la presión atmosférica) - Condiciones iniciales: N/A - Modo de solución: Estado Transitorio. - Movimiento Linear del objeto: Dirección [0,0,1]. <i>Flow driven</i>. Límite inicial 0 m. Límite final 0.7 m. - Turbulencia: Modelo K-Omega SST

DATOS SIMULACIÓN B – ESCENARIO 2 [K]
<ul style="list-style-type: none"> - Condiciones de Borde: <ul style="list-style-type: none"> ○ Presión Estática inicial [Pa] = 366 261 ○ Presión Estática final [Pa] = 0 (porque ya tiene contacto con la presión atmosférica) - Condiciones iniciales: N/A - Modo de solución: Estado Transitorio. - Movimiento Linear del objeto: Dirección [0,0,1]. <i>Flow driven</i>. Límite inicial 0 m. Límite final 0.7 m. - Turbulencia: Modelo K-Omega SST

9.6.4. Diseño 3D para la simulación del impulso del dardo



a)



b)

Figura F - 2: a) Dardo CAD 3D b) Dimensiones del dardo
Fuente: Autodesk Inventor 2020.

9.6.5. Comportamiento del perfil de velocidad de un objeto en un fluido laminar

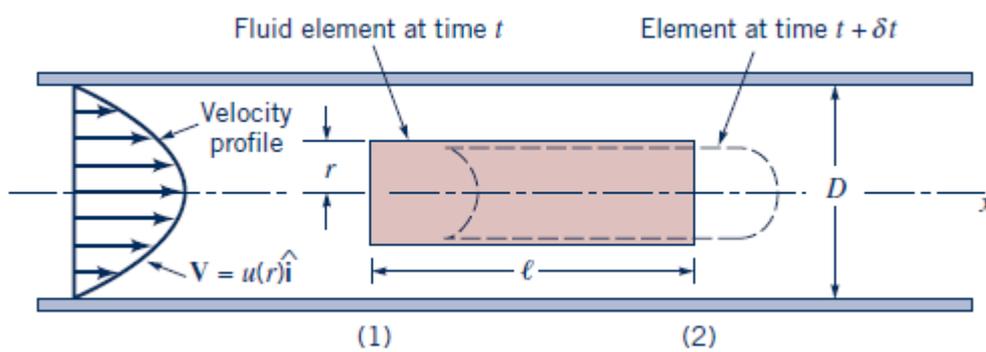
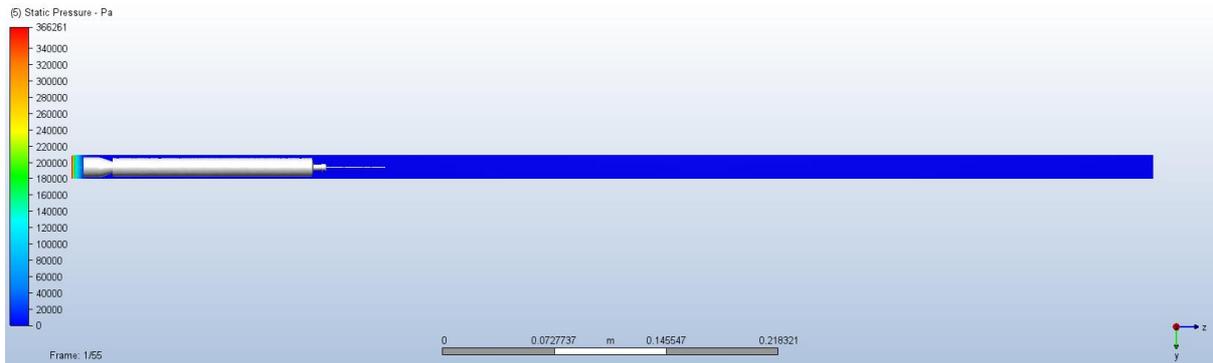


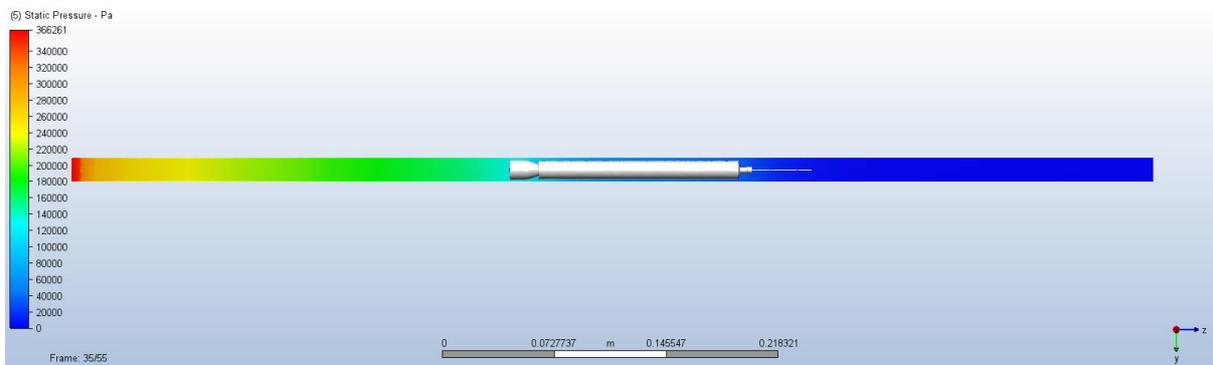
Figura F - 3: Movimiento de un elemento cilíndrico dentro de una tubería en un fluido completamente laminar

Fuente: Fuente: Libro Fundamentals of Fluid Mechanics Ed. VII.

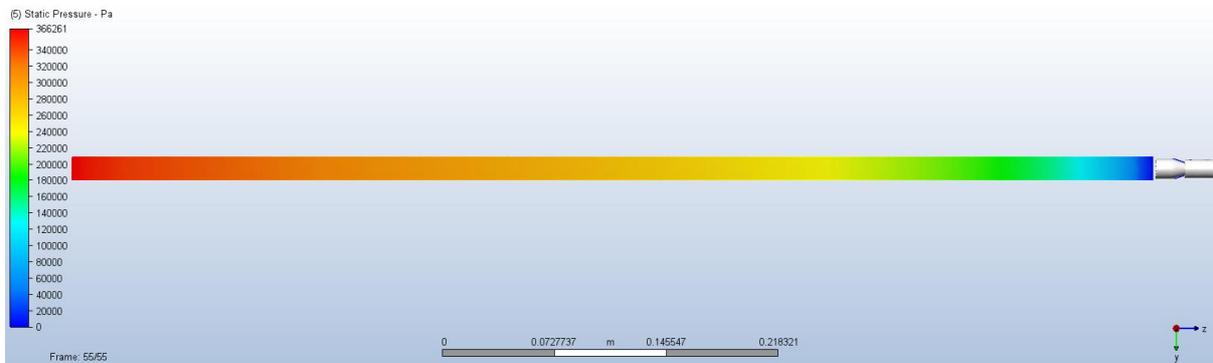
9.6.6. Expansión del aire a presión para el escenario B



a) Expansión del aire a presión: step 1.



b) Expansión del aire a presión: step 35



c) Expansión del aire a presión: step 55

Figura F - 4: Presión estática para el escenario B
Fuente: Autodesk CFD 2020.

9.6.7. Coeficiente de arrastre para un cilindro con flujo paralelo

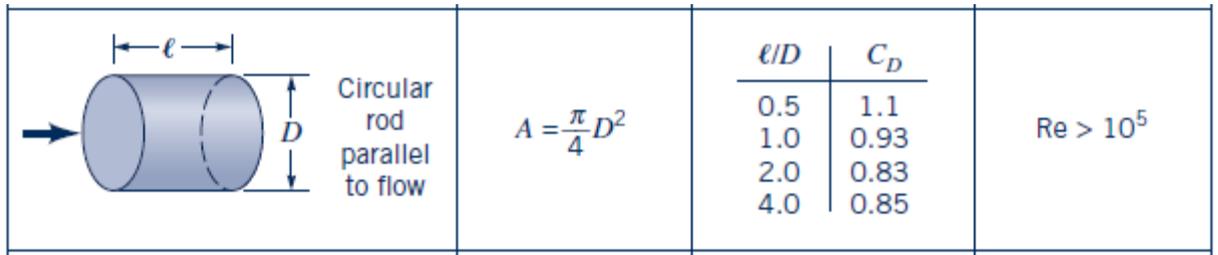


Figura F - 5: Coeficiente de arrastre para un cilindro con flujo paralelo al eje en función del número de Reynolds

Fuente: Fundamentals of Fluid Mechanics Ed. VII, p.533.

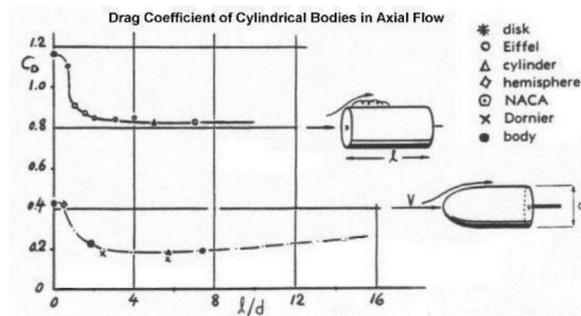


Figura F - 6: Coeficiente de drag para un cilindro con flujo paralelo al eje en función del número de Reynolds

Fuente: Experimental Study of Aerodynamic Behavior of Stretchable Sport Fabrics.

9.7. ANEXO G: MODELO COMPUTACIONAL ANÁLISIS DE LA DINÁMICA DEL DARDO.

9.7.1. Datos iniciales para el código

Tabla G - 1: Datos iniciales utilizados en el código de MATLAB

DATOS CONSTANTES:	
ρ_{aire} [kg/m ³]	1.225
m_{dardo} [kg]	0.01
g [m/s ²]	9.81
C_d	0.85
$\text{longitud}_{\text{dardo}}$ [m]	0.13
d_{dardo} [m]	0.012
A_{dardo} [m ²]	0.000113097
μ_{viscosa}	0.0000185
Longitud cañón [m]	0.6
Área cañón [m ²]	0.00031416
Área de resorte [m ²]	0.000264
Volumen Res. [m ³]	0.000012433

9.7.2. Datos calculados de la balística del dardo

Tabla G - 2: Datos calculados y constantes de la balística del dardo

DATOS CALCULADOS:	
V_{terminal} [m/s]	40.818
Fuerza Roz. [N]	0.017

9.7.3. Datos asumidos de la balística del dardo

Tabla G - 3: Datos asumidos para el impacto del dardo

DATOS ASUMIDOS:	
Tiempo impacto [s]	0.01

9.7.4. Código de MATLAB

El código utilizado en MATLAB trabaja con la siguiente función:

```
function [ x, y ,v, angle, tlog] = projectilemotion( v0, iangle, Np, x0, y0 )

%Inputs:
% v0 = initial launch velocity in meters per second(.001 to 2000)
% iangle = initial angle of launch (0 to 90 degrees)
% Np = number of points to plot (max 200)
% x0 = initial position in meters (0 to 10 000)
% y0 = initial height in meters (0 to 10 000)

% Returns:
% x = position vector
% y = height vector
% v = velocity vector
% angle = angle of trajectory vector
% tlog = time vector

%Componentes Velocidad
%para y si se considera el drag
vy = (vt*(vy0-(vt*tan((g.*t)/vt)))/(vt+(vy0*tan((g.*t)/vt)));
%find the y velocity

%para x si se considera el drag
vx = (vt^2*vx0)/(vt^2+(g*vx0.*t));
%find the x velocity

%Componentes Posicion
x(k) = x(k-1) + vx.*dt;           %find the x position
y(k) = y(k-1) + vy.*dt;           %find the y positon
```

```

%Componentes Aceleración
%Para Y
ay(k) = -g-b*(vx(k)*vx(k)+vy(k)*vy(k))^0.5*vy(k);
%Para X
ax(k) = -b*(vx(k)*vx(k)+vy(k)*vy(k))^0.5*vx(k);

%para y si se considera el drag
vy(k+1) = vy(k) + ay(k).*dt;
%find the y velocity

%para x si se considera el drag
vx(k+1) = vx(k) + ax(k).*dt;
%find the x velocity

% Velocidad Resultante
v(k) = sqrt(vx(k+1).^2 + vy(k+1).^2);
%find the velocity at pos.

%Componentes Posicion
x(k+1) = x(k) + vx(k).*dt + 0.5*ax(k).*(dt^2);
y(k+1) = y(k) + vy(k).*dt + 0.5*ay(k).*(dt^2);

```

9.7.5. Diferencia de altura para distintas posiciones de tiro. Masa 1

Tabla G - 4: Velocidad de impacto, presión inicial y diferencia de altura para distintas posiciones de impacto de la masa 1.

	Posición impacto	Tiempo de llegada	Velocidad de impacto	Fuerza de impacto	Velocidad de salida cañón	Presion inicial	Presión Inicial	Altura de choque (eje Y)	Diferencia de altura (ΔY)
	[m]	t [s]	F[N]	F[N]	Vi[m/s]	Pi[Pa]	Pi [psi]	Y[m]	ΔY [mm]
A	5	0.0669	73.6	73.63	75.83	831051	121	1.630	20.0
B	5	0.0838	58.8	58.80	60.56	529998	77	1.620	30.0
C	5	0.0857	57.5	57.50	59.22	506822	73	1.610	40.0
D	5	0.1376	35.8	35.80	36.87	196468	28	1.560	90.0
A	10	0.0668	71.7	71.66	76.00	834800	121	1.560	90.0
B	10	0.0795	60.2	60.16	63.80	588348	85	1.520	130.0
C	10	0.0832	57.5	57.50	60.99	537560	78	1.510	140.0
D	10	0.1304	36.7	36.68	38.91	218765	32	1.310	340.0
A	15	0.0668	69.6	69.56	75.98	834388	121	1.450	200.0
B	15	0.0755	61.5	61.55	67.23	653245	95	1.390	260.0
C	15	0.0808	57.5	57.50	62.81	570162	83	1.350	300.0
D	15	0.1235	37.6	37.61	41.09	243974	35	0.950	700.0
A	20	0.0670	67.3	67.34	75.76	829429	120	1.280	370.0
B	20	0.0716	63.0	62.98	70.85	725396	105	1.230	420.0
C	20	0.0784	57.5	57.50	64.69	604741	88	1.140	510.0
D	20	0.1169	38.6	38.59	43.41	272317	39	0.500	1150.0

9.7.6. Diferencia de altura para distintos ángulos de tiro. Masa 1

Tabla G - 5: Diferencia de altura para distintos ángulos de tiro de la masa 1.

	Posición impacto	Ángulo de tiro	Altura de choque (eje Y)
	[m]	Grados	Y[m]
A	5	0	1.630
B	5	0	1.620
C	5	0	1.610
D	5	1	1.65
A	10	0.5	1.65
B	10	1	1.7
C	10	1	1.69
D	10	2	1.66
A	15	1	1.7
B	15	1	1.65
C	15	1	1.61
D	15	2.5	1.6
A	20	1	1.63
B	20	1	1.6
C	20	1.5	1.66
D	20	3.25	1.64

9.7.7. Diferencia de altura para distintas posiciones de tiro. Masa 2

Tabla G - 6: Velocidad de impacto, presión inicial y diferencia de altura para distintas posiciones de impacto de la masa 2.

	Posición impacto	Tiempo de llegada	Velocidad de impacto	Fuerza de impacto	Velocidad de salida cañón	Presión inicial	Presión Inicial	Altura de choque (eje Y)	Diferencia de altura (ΔY)
	[m]	t [s]	F[N]	F[N]	Vi[m/s]	Pi[Pa]	Pi [psi]	Y[m]	ΔY [mm]
A	5	0.0760	65.0	84.53	66.51	831101	121	1.620	30.0
B	5	0.0952	51.9	67.51	53.12	530149	77	1.610	40.0
C	5	0.0860	57.5	74.75	58.82	649975	94	1.610	40.0
D	5	0.1564	31.6	41.11	32.34	196558	29	1.530	120.0
A	10	0.0759	63.7	82.83	66.66	834974	121	1.540	110.0
B	10	0.0904	53.5	69.54	55.97	588585	85	1.490	160.0
C	10	0.0841	57.5	74.75	60.16	680091	99	1.510	140.0
D	10	0.1480	32.7	42.46	34.18	219457	32	1.210	440.0
A	15	0.0759	62.3	80.96	66.66	834831	121	1.390	260.0
B	15	0.0822	57.5	74.75	61.54	711602	103	1.350	300.0
C	15	0.0857	55.1	71.65	58.99	653771	95	1.320	330.0
D	15	0.1399	33.8	43.90	36.14	245424	36	0.750	900.0
A	20	0.0761	60.7	78.93	66.47	830191	120	1.180	470.0
B	20	0.0803	57.5	74.75	62.95	744574	108	1.120	530.0
C	20	0.0813	56.8	73.83	62.17	726274	105	1.110	540.0
D	20	0.1323	34.9	45.40	38.24	274719	40	0.190	1460.0

9.7.8. Diferencia de altura para distintos ángulos de tiro. Masa 2.

Tabla G - 7: Diferencia de altura para distintos ángulos de tiro de la masa 2.

Posición impacto	Ángulo de tiro	Altura de choque (eje Y)
[m]	Grados	Y[m]
5	0	1.620
5	0	1.610
5	0	1.610
5	1	1.62
10	1	1.7
10	1	1.66
10	1	1.68
10	2.5	1.65
15	1	1.65
15	1	1.61
15	1.5	1.7
15	3.5	1.66
20	1.5	1.69
20	1.5	1.66
20	1.5	1.63
20	4.25	1.66