



UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID
ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO
ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL

MÁSTER UNIVERSITARIO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS ACTUALES EN
RÉPLICAS DE AIRSOFT

Alumno: D. JOAQUÍN ROCAMORA REVERTE

Director: D. FEDERICO

MAYO 2023

TÍTULO: ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN DE LOS SISTEMAS MECÁNICOS
ACTUALES EN RÉPLICAS DE AIRSOFT

AUTOR: JOAQUÍN ROCAMORA REVERTE

DIRECTOR DEL PROYECTO: FEDERICO GARCIA GALVAN

FECHA: 12 de Mayo de 2023

RESUMEN

Este proyecto reúne el trabajo realizado en la empresa MG Custom, para el estudio en profundidad de la mecánica dentro de una réplica de Airsoft y el análisis físico y matemático de todos los procesos que en ella intervienen a fin de determinar cuál es el margen de mejora actual dada la tecnología y productos existentes en el mercado.

El proyecto se divide en una primera parte teórica en la cual se desarrollarán los cálculos realizados en base a la Ley de Boyle, Modulo de Young, Ley de Hooke y principio de continuidad. También se hablará sobre otros efectos físicos presentes en la réplica no objeto de cálculo dentro del proyecto, pero sí necesarios para su comprensión como puede ser el efecto Magnus.

La segunda parte de este proyecto respalda los cálculos con pruebas de campo del prototipo Omega, así como un análisis de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Airsoft, efecto Magnus, Ley de Boyle, principio de continuidad, física

ABSTRACT

The aim of this project is to put together all the work done with the company MG custom, which is related with a deep investigation of the mechanics of an Airsoft gun and the physical and mathematical analysis of all the process that take part in it for the purpose of establishing which is the room for improvement taking into account the technology and products available in the market.

The project is divided in different parts. Firstly, a theoretical part in which the calculations are developed taking into account Boyle's law, Young's modulus, Hooke's law and the continuity principle. Moreover, other physical effects, which take place into the gun but are not calculation objective in this project, will be explained, due to its importance when it comes to understanding how the gun works, for instance Magnus effect.

The second part of this project backs up the calculations with field tests of the Omega's prototype, as well as an analysis of the results which have been obtained.

Key words: Airsoft, Magnus effect, Law of Boyle, principle of continuity, Physic

Índice de ilustraciones

Ilustración 1: Imagen representativa de la sección de una réplica eléctrica donde quedan visibles los componentes internos.....	9
Ilustración 2: Sistema de HPA modelo PULSAR de la marca Gate Enterprise (8).....	10
Ilustración 3: Transparencia de sección del mecanismo de una réplica modelo VSR 10 accionada por muelle manual	11
Ilustración 4: Modelo Hk 417 de la marca VFC, variante de AR15 más vendido en el mercado del Airsoft, ejemplo del fusilero más común	13
Ilustración 5: Ejemplo comercial de una réplica de apoyo presente en mercado	14
Ilustración 6: Modelo SR25 de la marca Golden Eagle, modelo comercial más utilizado para su uso en el rol de tirador selecto	15
Ilustración 7: Modelo VSR de la marca Tokyo Marui, el más vendido en mercado dentro del rol de francotirador	16
Ilustración 8: Ejemplo de grafica esfuerzo-deformación.....	17
Ilustración 9: Representación gráfica de un cilindro inmerso en una corriente de aire	19
Ilustración 10: Batería de 11,1 V, 1200 mA y 25 C de la marca Nimrod (7)	20
Ilustración 11: Gatillo ETU TITAN versión V2 de la marca Gate Enterprise (8)	21
Ilustración 12: Motor con escobillas de 30.000 RPM de eje corto de la marca Nimrod (7).....	22
Ilustración 13: Motor sin escobillas con velocidad variable 27/37 RPM de eje corto de la marca Nimrod (7).....	23
Ilustración 14: Conjunto de engranajes de relación 12:1 de la marca SHS (9).....	24
Ilustración 15: Anti- reverse para modelos V2 de la marca SHS (9)	24
Ilustración 16: Apertura del Gearbox del proyecto donde se aprecia la parte del proceso de transmision de movimiento entre engranajes y piston	25
Ilustración 17: Goma de hop up Guarder de silicona utilizada en el proyecto, se puede aprecia una protuberancia dentro de ella, es el sim	26
Ilustración 18: Conjunto de precisión del proyecto	27
Ilustración 19: Despiece del proyecto donde se ven posicionados conjuntos de engranajes y motor	29
Ilustración 20: Pistón modelo SR25 empleado en el proyecto.....	31
Ilustración 21: Despiece de las dos caras del gearbox y los muelles 140M y 120M, siendo estos el coroy el largo respectivamente.....	32
Ilustración 22: Pesaje del pistón utilizado en el proyecto	33
Ilustración 23: Diagrama de fuerzas entre el proyectil y el sim de la goma de hop up	34
Ilustración 24: Modelo del prototipo del cuello de la cabeza de cilindro hecho a 3D en Inventor	43

Índice de gráficas

Gráfica 1: Gráfica representativa de los valores de energía calculados para los diferentes pesos de proyectil	40
Gráfica 2: Resultados de las mediciones de potencia, en cronógrafo, de diferentes pesos de proyectil disparados por una Infinity y por una Omega	46
Gráfica 3: Resultados de las mediciones de potencia, en cronógrafo, de proyectiles de 0,20 g disparados por una Infinity y por una Omega con hop up ajustado para los diferentes pesos de proyectiles.....	47
Gráfica 4: Valores medidos del alcance efectivo de una Infinity.....	48
Gráfica 5: Valores medidos del alcance máximo de una Infinity.....	48
Gráfica 6: Valores medidos del alcance efectivo de una Omega.....	49
Gráfica 7: Valores medidos del alcance máximo de una Infinity.....	49
Gráfica 8: Valores de superficies de agrupación a diferentes distancias con diferentes pesos de proyectil disparados por la Infinity	50
Gráfica 9: Valores de superficies de agrupación a diferentes distancias con diferentes pesos de proyectil disparados por la Omega	51
Tabla 1: Datos de partida de los cálculos.....	28

Contenido

.....	1
AGRADECIMIENTOS	7
OBJETIVO Y ALCANCE	8
1. INTRODUCCION	8
1.1. HISTORIA	8
1.2. AIRSOFT	9
1.3. LEY DE BOYLE	16
1.4. Ley de Hooke y módulo de Young.....	17
1.5. EFECTO MAGNUS	19
1.6. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LOS TEOREMAS SOBRE EL SISTEMA ESTUDIADO	20
1.6.1. ESQUEMA MECÁNICO DE UNA AEG.....	20
1.6.2. ESQUEMA FÍSICO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA AEG	27
2. PARTE EXPERIMENTAL	40
2.1. FASE DE DISEÑO	40
2.1.1. Estudios previos	40
2.1.2. Fase de prototipado.....	42
2.2. PRUEBAS DE CAMPO	43
2.2.1. PRUEBA DE CORRECTO CICLO DESDE EL ENFOQUE DE REGLAJE MECÁNICO	43
2.2.2. PRUEBA DE CONSERVACION DE ENERGIA DEL PROYECTIL	44
2.2.3. PRUEBAS DE ALCANCE Y PRECISIÓN	45
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
3.1. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE REGLAJE MECÁNICO	46
3.2. RESULTADOS PRUEBA DE CONSERVACION DE ENERGIA ENTRE PROYECTILES	46
3.3. RESULTADOS PRUEBAS DE ALCANCE	48
3.4. RESULTADOS PRUEBAS DE PRECISIÓN	50
4. CONCLUSIONES	52
5. POSIBLES MEJORAS	52
Bibliografía	53

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quería agradecer a mis padres por apoyarme y darme la oportunidad de educarme en lo que me apasiona, para el día de mañana dedicarme a ello, también a todas las personas que a lo largo del camino que ha sido, no solo este proyecto, sino la universidad, han estado conmigo y han formado parte de ella. Gracias a familiares y amigos por aguantarme durante el proceso de redacción de la memoria, se que no ha sido fácil. Gracias a mi pareja por estar conmigo en la recta final y más dura del proceso, acompañándome largas noches escribiendo día tras día .

Por último, gracias a Federico por confiar en mi y permitirme presentar un proyecto que significa tanto para mí, que no solo se quedará en una presentación de master, sino que seguirá como proyecto de vida, también gracias por la paciencia y los consejos.

Gracias a la universidad por la enseñanza y permitirme estar hoy aquí

OBJETIVO Y ALCANCE

Este proyecto nació de la idea de investigar donde se encontraba el techo de avance y mejora mecánica de una réplica de airsoft, considerando esta información valiosa para la empresa MG Custom de cara a planificar la salida de productos de cara a los próximos años. Para lograr este objetivo se realizará un estudio minucioso de la física involucrada en el funcionamiento de las réplicas, así como de la mecánica que forma todo el sistema a fin de encontrar como exprimirla al máximo sin llegar a un rediseño completo.

Este proyecto se centra en los resultados obtenidos de las pruebas de alcance y precisión, así como de conservación de energía entre diferentes gramajes sin exceder los 1,14 J y manteniéndose estable en estos. Durante el desarrollo del mismo se llegaron a diseños y fórmulas que resultan interesantes de aplicar a modo de mejora en productos existentes, sin embargo, el estudio económico o detallado de su aplicación en productos existentes.

1. INTRODUCCION

1.1. HISTORIA

El origen histórico del Airsoft tiene sus orígenes en Japón a principios de la década de 1970, Ichigo Nagata, un gran entusiasta de las armas de fuego y fotógrafo, tuvo la idea de fabricar un modelo de pistolas que dispararan proyectiles no mortales. Este modelo de “arma” fue catalogado como arma de aire comprimido, satisfaciendo así las necesidades de los apasionados de los disparos y respetando el estricto control de armas de la *Ley de Control de Posesión de Armas de Fuego y Espadas de Japón*.

El nombre de Airsoft “*Aire Suave*” hace referencia a la combinación de freón y aceite de silicona comprimidos como forma de impulsión del proyectil, este era significativamente más débil que el CO₂ encapsulado utilizado en armas de aire comprimido anteriores.

Pensadas inicialmente para su uso en tiro al blanco, la munición de 6mm, hecha en su mayoría de PLA, pueden usarse contra humanos sin riesgo de causar lesiones graves, esto se debe a su baja energía de impulsión en salida de cañón, aunque puede causar daños graves en tejidos blandos como puede ser los globos oculares.

1.2. AIRSOFT

Para dar contexto a los factores o limitaciones que se tuvieron en cuenta a la hora de diseñar el producto, explicare las mecánicas, normativas y funcionamientos del Airsoft.

A rasgos generales, el Airsoft se trata de un deporte de estrategia el cual simula situaciones o conflictos militares. Se utilizan “replicas” de armas las cuales usan proyectiles de 6 mm de PLA a baja energía, de forma que nunca se pueda llegar a causar heridas graves a ningún jugador siempre y cuando use protección ocular. La eliminación es por impacto de proyectil, que, a diferencia del paintball, no deja ningún rato en el eliminado, por lo tanto, es un deporte que necesita de la honestidad de sus propios jugadores para su buen funcionamiento.

Estas “replicas” o marcadoras, se encuentran en el mercado con diferentes mecánicas de funcionamiento, todos ellos basados en la generación de una presión, ya sea de aire o gas, que impulse el proyectil a través de un cañón liso, variando estas mecánicas en la forma de conseguir dicha presión o el gas utilizado.

- **AEG:** El mecanismo más utilizado dentro del Airsoft, tanto por jugadores como por fabricantes (**Ilustración 1**).

Consiste en una caja reductora de tres engranajes movida por un motor, la cual retrae un pistón ubicado dentro de un cilindro y con un muelle en la parte posterior, de forma que, al retraerse, se comprime, hasta que llega a la parte no dentada del engranaje que suelta el muelle e impulsa el pistón por dentro del cilindro, generando así una compresión de aire la cual impulsara el proyectil a lo largo del cañón.



Ilustración 1: Imagen representativa de la sección de una réplica eléctrica donde quedan visibles los componentes internos

El sistema es alimentado por una batería ubicada normalmente en la parte posterior llamada “culata”, estas son de 7,4 o 11,1 voltios, de entre 1000-1500 amperios y 25 celdas de descarga.

- **GAS:** Este sistema principalmente se encuentra en réplicas de arma corta o pistolas, aunque también hay modelos de fusiles y subfusiles.

Consiste en un depósito de gas, que suele ser derivados del butano, el cual es liberado de manera controlada gracias a un mecanismo de martillo y válvula, impulsando al proyectil con la presión que este ejerce al liberarse a través del cañón.

- **CO₂:** Al igual que las réplicas de gas, principalmente se encuentra en arma cortas, aunque también en fusiles y subfusiles, y a diferencia del gas, también podremos encontrar “replicas” de francotirador utilizando el CO₂ como fuente de impulsión para el proyectil, ya que puede ofrecer presiones mucho mayores que los gases habituales.
- **HPA:** Este sistema es compatible con todo tipo de réplica, normalmente es un sistema post-market, vendiéndose por separado para su instalación en productos ya existentes en mercado, a excepción de una o dos empresas que lo venden con la instalación previa.

Este mecanismo se basa en aire a presión, un depósito de este hace de fuente de impulso para el proyectil, utiliza sistemas de solenoides, depende el modelo o fabricante, que se acción de forma mecánica o controlado por electrónica (**Ilustración 2**). Este sistema también lo vemos en las marcadoras utilizadas en el paintball, aunque en estas siempre tiene solenoides activados de forma mecánica.



Ilustración 2: Sistema de HPA modelo PULSAR de la marca Gate Enterprise (8)

- **MUELLE:** Este sistema por lo general solo se encuentra en réplicas de acerojado manual, sistema propio de los francotiradores (**Ilustración 3**).

Posiblemente el más simple de los sistemas, en esencia es similar al conjunto de compresión formado por pistón, muelle y cilindro de las AEG, pero lo que realiza la retracción y compresión es el propio usuario manualmente.

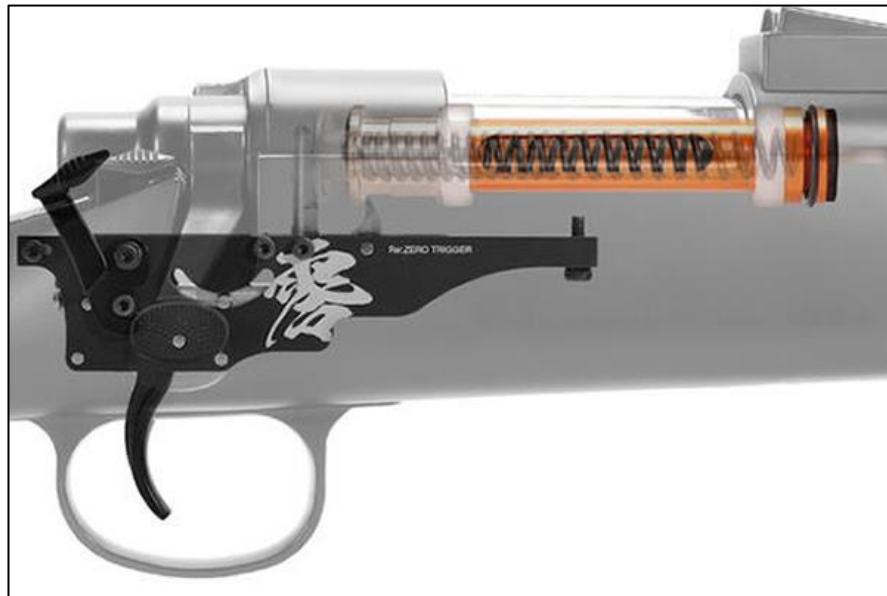


Ilustración 3: Transparencia de sección del mecanismo de una réplica modelo VSR 10 accionada por muelle manual

Dentro del AIRSOFT, se distinguen 3 modalidades principales: Speedshoft, partidas normales o “domingueras” y MIL-SIM.

- **Speedshoft:** Esta modalidad es la más frenética de todas, teniendo más semejanzas en cuanto a mecánicas y funcionamiento al paintball que a una simulación militar. Consiste en un enfrentamiento 5 vs 5 en un campo de 15x30 metros con parapetos interiores de diferentes alturas y simétricos entre mitades de campo.

En esta modalidad no existen roles referentes al tipo de réplica o potencia de uso, todos los participantes están limitados a 1 julio de potencia y por lo general los gramajes de uso son de 0,20-0,25 gramos.

Esta modalidad es la única que cuenta con liga competitiva, tanto a nivel nacional como internacional. El objetivo dentro del campo es conseguir puntos, los cuales pueden lograrse eliminando jugadores del otro equipo (1 punto), consiguiendo la bandera o testigo colocado en la zona central (5 puntos) o llegando hasta la pared del equipo contrario (3 puntos).

La duración de las rondas o partidos completos, son bastante cortas, se juegan un total de 5 rondas por partido y cada ronda no suele exceder los 10 minutos, dejando un partido medio en 1 hora de duración. A pesar del corto tiempo de juego, de media un jugador puede realizar de 4000-5000 disparos en un solo partido, siendo la modalidad donde más estrés y uso reciben las réplicas, por lo que el sistema predominante es el HPA al trabajar, por lo general, mejor

ante uso continuado y sufriendo un desgaste mucho menos y mayor consistencia frente a una AEG o una “replica” de GAS.

- **Partidas normales o “domingueras”:** Esta modalidad sería la estándar entre las 3, la más practicada y la más habitual de encontrar en cualquier campo donde se practique el Airsoft. El término “dominguera” se acuñó en España debido a que, por lo general, este tipo de partida se organizan los domingos por la mañana.

En esta modalidad existe la posibilidad de elegir un rol de juego concreto, el cual va a definir los siguientes factores en tu modo de jugar durante la partida.

- la potencia a la que puede ir tu réplica.
- la cadencia o modo de disparo que podrás utilizar.
- la distancia mínima a la que podrás disparar a un jugador.
- la cantidad de munición que podrás llevar durante la partida; (esto solo lo condicionan algunos campos de juego, no se suele limitar en todos).
- gramaje de munición que puedes utilizar; (no se ve en todos los campos).

Los roles principales que se pueden encontrar en cualquier campo de Airsoft y sus condicionantes son los siguientes, aunque en algunos campos podemos encontrar algunos roles especiales que el propio campo define, aunque aquí nos limitaremos a presentar los comunes que siempre pueden elegirse dentro de este tipo de partidas:

❖ FUSILERO

El rol por defecto, por así decirlo, este sería el rol básico y el más presente en todas las partidas. Las características y condicionantes en juego de este rol serían:

- Potencia máxima permitida 1,13-1,14 julios, esta potencia se mide utilizando un cronógrafo, herramienta que mide la velocidad de los proyectiles al dispararlos a través de ella, la unidad universal acogida dentro de este deporte, es la americana FPS (pies por segundo en lengua inglesa) y el procedimiento oficial de medición sería usando el gramaje de uso durante partida y con hop up ya regulado para dicho gramaje.
- Distancia de seguridad a la cual se puede efectuar un disparo contra otro jugador ronda entre los 0-5 metros, en función de la normativa concreta de cada campo, en el caso de los campos que limitan a 5 metros esta distancia, cualquier eliminación a menos de esa distancia debe efectuarse con las denominadas réplicas secundarias.

Estas réplicas secundarias mayormente se tratan de réplicas de arma corta como son las pistolas o escopetas, las cuales tienen una limitación de 1 julio de potencia máxima para así considerarse seguras para su uso a “distancia 0”

- Por lo general, excepto en casos concretos de algún guion especial o norma particular de algún campo, este rol no suele tener limitación ni en la cantidad de munición que puede portar encima, como en la capacidad de los cargadores que use en juego.

- Generalmente, a este rol se le permite el disparo en semiautomático, ráfagas programadas o el uso del modo automático de forma moderada (ráfagas de entre 8-12 disparos).



Ilustración 4: Modelo Hk 417 de la marca VFC, variante de AR15 más vendida en el mercado del Airsoft, ejemplo del fusilero más común

❖ APOYO

- Potencia máxima permitida 1,48 julios, esta potencia se mide utilizando un cronógrafo, herramienta que mide la velocidad de los proyectiles al dispararlos a través de ella, la unidad universal acogida dentro de este deporte, es la americana FPS (pies por segundo en lengua inglesa) y el procedimiento oficial de medición sería usando el gramaje de uso durante partida y con hop up ya regulado para dicho gramaje.
- Distancia de seguridad a la cual se puede efectuar un disparo contra otro jugador ronda entre los 10-15 metros, en función de la normativa concreta de cada campo, en el caso de tener que eliminar a un jugador a menos de esa distancia, cualquier eliminación debe efectuarse con las denominadas réplicas secundarias.

Estas réplicas secundarias mayormente se tratan de réplicas de arma corta como son las pistolas o escopetas, las cuales tienen una limitación de 1 julio de potencia máxima para así considerarse seguras para su uso a “distancia 0”

- Por lo general, excepto en casos concretos de algún guion especial o norma particular de algún campo, este rol no suele tener limitación ni en la cantidad de munición que puede portar encima, como en la capacidad de los cargadores que use en juego.
- Generalmente, a este rol se le permite el disparo en semiautomático, ráfagas programadas y el uso libre del modo automático, al entenderse que es parte importante del rol poder disponer de esa capacidad de supresión haciendo uso del modo automático de forma prolongada.



Ilustración 5: Ejemplo comercial de una réplica de apoyo presente en mercado

❖ TIRADOR SELECTO

- Potencia máxima permitida 1,81 julios, esta potencia se mide utilizando un cronógrafo, herramienta que mide la velocidad de los proyectiles al dispararlos a través de ella, la unidad universal acogida dentro de este deporte, es la americana FPS (pies por segundo en lengua inglesa) y el procedimiento oficial de medición sería usando el gramaje de uso durante partida y con hop up ya regulado para dicho gramaje.
- Distancia de seguridad a la cual se puede efectuar un disparo contra otro jugador ronda entre los 15-20 metros, en función de la normativa concreta de cada campo, en el caso de tener que eliminar a un jugador a menos de esa distancia, cualquier eliminación debe efectuarse con las denominadas réplicas secundarias.

Estas réplicas secundarias mayormente se tratan de réplicas de arma corta como son las pistolas o escopetas, las cuales tienen una limitación de 1 julio de potencia máxima para así considerarse seguras para su uso a “distancia 0”

- Este rol, normalmente cuenta con ciertas limitaciones en cuanto a la capacidad de los cargadores de uso en partida, pero sin limitar cuantos puedes portar encima durante el transcurso de la misma. Esta limitación suele basarse en la capacidad de munición del homólogo real, por ejemplo, en el caso de un HK 417 que utiliza munición del 7,62 x 51 OTAN suele tener una capacidad de cargador de entre 10-20 proyectiles, aunque en ocasiones se deja margen hasta 40 en el caso del Airsoft.

- Otra limitación asociada a este rol es el cómo proceder a la hora de realizar un disparo, únicamente está permitido usar el modo semiautomático, y debe haber un margen de 2 segundos entre disparo y disparo como mínimo, normalmente la referencia que se da es que no puedes realizar el siguiente disparo hasta que el proyectil previo no haya errado el objetivo.



Ilustración 6: Modelo SR25 de la marca Golden Eagle, modelo comercial más utilizado para su uso en el rol de tirador selecto

❖ FRANCOTIRADOR

- Potencia máxima permitida 2,8 julios, esta potencia se mide utilizando un cronógrafo, herramienta que mide la velocidad de los proyectiles al dispararlos a través de ella, la unidad universal acogida dentro de este deporte, es la americana FPS (pies por segundo en lengua inglesa) y el procedimiento oficial de medición sería usando el gramaje de uso durante partida y con hop up ya regulado para dicho gramaje.
- Distancia de seguridad a la cual se puede efectuar un disparo contra otro jugador ronda entre los 20-40 metros, en función de la normativa concreta de cada campo, este rol suele causar más polémica puesto que es el que mayor potencia permite en juego, de ahí tanta disparidad entre campos referente a la distancia mínima. En el caso de tener que eliminar a un jugador a menos de esa distancia, cualquier eliminación debe efectuarse con las denominadas réplicas secundarias.

Estas réplicas secundarias mayormente se tratan de réplicas de arma corta como son las pistolas o escopetas, las cuales tienen una limitación de 1 julio de potencia máxima para así considerarse seguras para su uso a “distancia 0”

- La normativa de los campos en este modo de juego, normalmente no ponen restricciones referentes a la munición que puede portar o limitar los cargadores, esto se debe a que las únicas réplicas que se permiten en este rol son las “réplicas de muelle”, estas en el mercado solo se encuentran con capacidades bajas de munición en los cargadores y al armarse de manera manual, no supone una problemática la cantidad de munición ya que su uso es considerablemente lento respecto al resto.
- Al armarse de manera manual y solo poder realizar los disparos de manera única, no es necesaria normativa alguna o limitación referente al modo de disparo.



Ilustración 7: Modelo VSR de la marca Tokyo Marui, el más vendido en mercado dentro del rol de francotirador

Este modelo de partidas tiene una duración media de 4 horas a intervalos de 2 horas con un descanso de 15-30 minutos. A diferencia de la modalidad del “speedsoft”, en las “domingueras” suelen ser partidas guionizadas, se les da a objetivos simples como pueden ser captura de la bandera, dominar una posición, conseguir un número de objetivos repartidos por el campo y semejantes, un contexto más extenso para que sea más inmersivo. Estos guiones van rotando o cambiando de una partida a otra para que no resulte repetitivo para los jugadores.

1.3. LEY DE BOYLE

Esta ley se creó sobre el 1643, cuando el científico italiano Evangelista Torricelli (1608-1674), se encontraba trabajando en una de sus creaciones, la cual sería conocida posteriormente como barómetro, logro demostrar que una columna de gas ejerce una presión y que esta podía llegar a medirse.

El trabajo de Torricelli llamo la atención de Robert Boyle (1627-1691), un químico inglés, que, motivado por este, decidió realizar estudios más precisos sobre las variaciones del volumen en muestras gaseosas causados por cambios en la presión. En 1662 anuncio los resultados de su investigación y experimentos llegando a la conclusión de que “*el volumen de una cantidad fija de gas a temperatura constante, es inversamente proporcional a la presión del gas*”. (1)

Esta conclusión es lo que conocemos actualmente como Ley de Boyle y matemáticamente se expresa de la siguiente forma: (2)

$$V \propto \frac{1}{P}$$

Donde **V** hace referencia al volumen del gas y **P** a la presión, por lo tanto, para cambiar el signo de proporcionalidad (α) por uno de igualdad, es necesario introducir una constante de proporcionalidad (**K**): (2)

$$V = k \cdot \frac{1}{P} \quad \rightarrow \quad P \cdot V = k \quad (\text{LEY DE BOYLE})$$

Lo que implica esta expresión es que siempre que se tenga una cantidad fija de gas a una temperatura constante, el producto del volumen por la presión siempre es igual a una constante **k**.

Esta ley se aplica en el proceso de disparo durante la primera parte del recorrido del pistón, durante la fase de compresión, en esta, el cilindro todavía no ha alcanzado la presión suficiente para hacer que la bola supere el sim de la goma del hop up, por lo tanto, durante este recorrido el sistema es equivalente a uno de cilindro sellado en el que se comprime aire. Para simplificar un ejemplo, sería como el caso del embolo de una jeringuilla si tapáramos el orificio de salida. (2)

1.4. Ley de Hooke y módulo de Young

Los resultados de los ensayos a tensión se representan en graficas XY, donde en el eje de ordenadas se representan los esfuerzos y en el de abscisas, la deformación unitaria; a este grafico se le conoce como **diagrama esfuerzo-deformación (Ilustración 8)**. La elasticidad, por otro lado, es la propiedad que define la capacidad de un objeto a recuperar su forma tras cesar la aplicación de las fuerzas causantes de dicha deformación. Robert Hooke estableció que el esfuerzo es proporcional a la deformación, a esto se le conoce como la Ley de Hooke. (3)

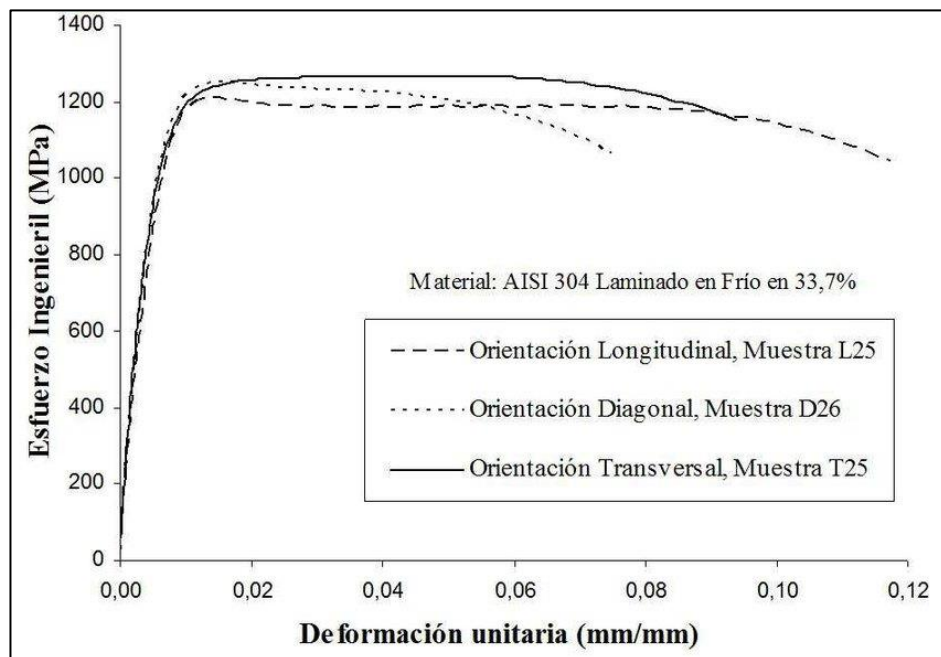


Ilustración 8: Ejemplo de grafica esfuerzo-deformación

La pendiente de este segmento de la gráfica es el **módulo de elasticidad (módulo de Young)** del material en cuestión y es representado con el carácter E, por lo tanto: (3)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

El esfuerzo es una consecuencia de las fuerzas internas que se producen en un cuerpo por la aplicación de cargas externas. A la intensidad de la fuerza aplicada por unida de superficie transversal se le llama **esfuerzo unitario** [σ]: (3)

$$\sigma = \frac{dP}{dA}$$

El esfuerzo unitario se encuentra en N/m², donde P es la carga aplicada (N) y A es el área sobre la cual actúa la carga (m²). Si la resultante al sumatorio de las fuerzas aplicadas se cruza por el centroide de la superficie, se puede simplificar a la siguiente expresión: (3)

$$\sigma = \frac{dP}{dA}$$

Cunado un objeto se encuentra bajo un esfuerzo, este sufre un cambio de longitud, este se conoce como **deformación**. Al definir este cambio en la longitud por unidad, se le llama **deformación unitaria** [ε]: (3)

$$\varepsilon = \frac{d\delta}{dL}$$

La deformación unitaria se encuentra en (m/m), donde δ es la deformación total (m) y L es la longitud inicial u original del objeto de calculo (m). Para ser viable la aplicación de estas fórmulas, deben cumplirse las siguientes condiciones: (3)

- El objeto de cálculo debe tener una sección transversal uniforme
- El material debe de ser homogéneo
- La o fuerza a la que se somete el elemento de cálculo, debe de ser uniforme

Cumpliendo estas condiciones, podemos simplificar la expresión de la deformación unitaria como: (3)

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L}$$

Estos principios sirven para desarrollar cuanta presión se debe general en el cilindro para, con un ajuste específico de hop up, conseguir que la bola sobrepase el sim. Para ello usamos de base un estudio externo donde se desarrolla de forma experimental valores de módulo de Young para el látex, material del cual está fabricada la gran mayoría de gomas de hop up del mercado junto al caucho y el que se ha cogido como objeto de estudio en este proyecto.

1.5. EFECTO MAGNUS

El efecto Magnus se encuentra presente durante el vuelo del proyectil, siendo esencial para lograr prolongar este de forma considerable, no obstante, dentro de este proyecto solo se le hará mención como parte presente en el proceso de cualquier replica, sin sufrir modificaciones respecto a otros modelos, esto se debe a que se considera que el estudio de su modificación o rediseño, sería materia de un estudio aparte que no se contempla dentro de este proyecto, por lo tanto, no se verá reflejado en los cálculos.

Para entender su papel dentro del proceso, describiremos brevemente en qué consiste para el caso concreto de una sección circular, ya que es la dada en este proyecto.

El efecto Magnus es un fenómeno aerodinámico que aparece en cuerpos en rotación sumergidos en una corriente de aire en sentido perpendicular al eje rotacional, en los cuales se genera una fuerza de sustentación perpendicular a dicha corriente, capaz de generar un cambio en la trayectoria de un cuerpo en vuelo libre. (4)

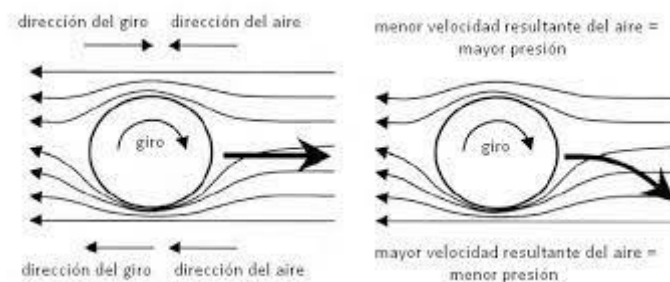


Ilustración 9: Representación gráfica de un cilindro inmerso en una corriente de aire

Como se puede ver en la **ilustración 9** al colocar un cuerpo dentro de una corriente, estando este en rotación, provoca que, en una de las superficies, este giro vaya a favor de la corriente del aire y este tenga una velocidad mayor a la cara opuesta, ya que, debido al giro, tendrá sentido opuesto a la corriente y provocará una deceleración en este. En la zona de mayor velocidad se generará zona de baja presión a causa de esa alta velocidad de aire circulando, mientras que, en la otra cara, pasará lo opuesto, la corriente de aire decelerada generará una zona de alta presión. La zona de alta presión provocará un empuje hacia la zona de baja presión, cambiando así la trayectoria del cuerpo y dándose el efecto Magnus. (4)

1.6. APLICACIÓN PRÁCTICA DE LOS TEOREMAS SOBRE EL SISTEMA ESTUDIADO

En este proyecto tomaremos como base el modelo de réplica AEG (Automatic Electric Gun), las cuales hemos desarrollado brevemente en el apartado 1.2.

La razón de elegir como base del estudio este sistema es principalmente su estandarización dentro de la industria, lo cual permite el acceso a un mayor número de piezas en el mercado y tener mayor público a la hora de comercializarlo. Otra de las razones es que, entre los diferentes sistemas, las AEG tienen menos factores incontrolables, como puede ser el caso de las réplicas de Gas, que dependiendo de la temperatura y humedad, su rendimiento varía drásticamente.

1.6.1. ESQUEMA MECÁNICO DE UNA AEG

Desarrollando más en profundidad la descripción del apartado “1.2.”, analizaremos el proceso completo que se desarrolla dentro de una AEG desde que se pulsa el gatillo, hasta que el proyectil abandona la totalidad del sistema y se encuentra en vuelo libre.

○ Fuente de alimentación y sistema de gatillo

Como bien describe su nombre, se trata de un sistema alimentado por una fuente eléctrica, generalmente por baterías de litio (Lipo) con tensiones de 7,4 V, 8V y 11,1V; capacidad de almacenamiento de entre 500 mA y 2500 mA y con una tasa de descarga de 15 C a 25 C (**Ilustración 10**). Esto rangos de baterías son los que comúnmente se comercializan.

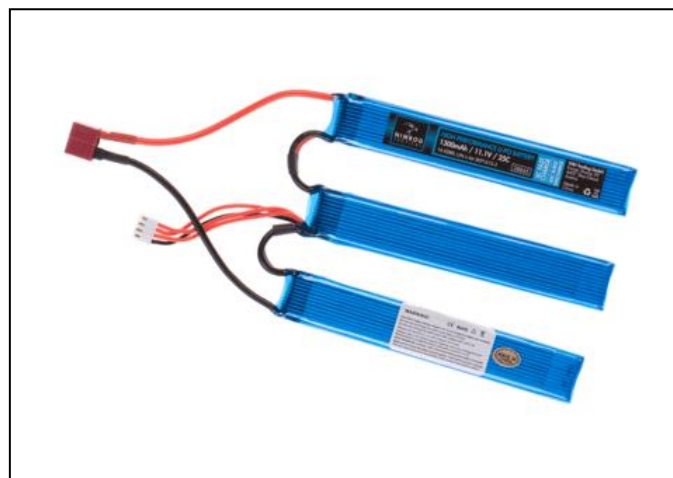


Ilustración 10: Bateria de 11,1 V, 1200 mA y 25 C de la marca Nimrod (7)

Una vez definida la fuente de alimentación, la cual se conecta al sistema de gatillo mediante conector tipo TAMILLA o en caso de réplicas y sistemas más modernos, T-DIN por ofrecer una mayor superficie conductora en la conexión, pasaremos a explicar los dos principales tipos de gatillo:

➤ ANALÓGICO

Hasta hace 3-4 años, el sistema por defecto en todas las réplicas comerciales en el mercado. Es un sistema de accionamiento similar a un interruptor, el positivo conecta directamente de la batería al motor, por otro lado, el negativo cuenta justo a la salida de la alimentación con una caja de fusibles para proteger frente sobre tensiones y continua hasta el mecanismo de gatillo, el cual consiste en una lengüeta de cobre que, al apretar el gatillo, hace contacto con dos pletinas cerrando el circuito y accionando el motor.

En modo semiautomático, tras realizar un ciclo, un saliente del tercer engranaje levanta la lengüeta abriendo de nuevo el circuito y haciendo necesario soltar y volver a apretar el gatillo para realizar otro ciclo, por otro lado, en el modo automático, se desactiva la función de reseteado de la lengüeta y el sistema cicla hasta que no se suelte el gatillo.

➤ E.T.U. (Electronic Trigger Unit)

El Sistema más moderno del mercado, pasando de un control analógico a uno digital. Estos gatillos electrónicos revolucionaron el control posible dentro de una réplica de Airsoft, sus pioneros y más importante compañía fueron GATE hace aproximadamente 8 años, y a día de hoy, incluso los fabricantes ya incorporan sus propias versiones de ETU en sus réplicas comerciales (**Ilustración 11**).

La principal ventaja de estos gatillos es de, mediante sensores ópticos o de barrera, son capaces de leer la posición del tercer engranaje y permitiendo regular su posición al final de cada ciclo, estos ETU son, a fin de cuentas, pequeños ordenadores que controlan el motor y sus funciones de manera precisa y pueden leer la situación del mecanismo, permitiendo ajustar este en gran medida de forma remota en las versiones más moderna o mediante conexión por cable a través del conector de la batería.

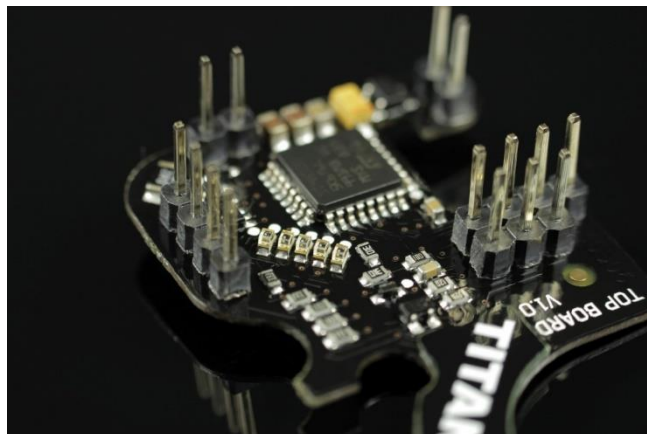


Ilustración 11: Gatillo ETU TITAN versión V2 de la marca Gate Enterprise (8)

El accionamiento del gatillo es leído por un pulsador o final de carrera, o por sensores ópticos, estos últimos permiten un ajuste más preciso. El selector de tiro, de igual forma es detectado por el sistema por sensores, regulando así de forma digital las funciones de disparo, ampliando su configuración respecto a sus antecesores analógico permitiendo el disparo binario, control de ráfagas y sensibilidad del disparo.

- *Motor*

Una vez transmitida la orden de iniciar el ciclo por parte del sistema de gatillo, este empieza accionando el motor, musculo de este mecanismo que transmite el movimiento a un sistema reductor de 3 engranajes mediante un piñón con dientes en 45º, conectando así perpendicular a los ejes de los engranajes.

Los motores eléctricos más comunes en el mercado son los motores de escobillas, con rangos de velocidades que van de las 15.000 rev/min a 50.000 rev/min y potencias de par de entre 16 TPU a 24 TPU, siendo inversamente proporcional su par a la velocidad (**Ilustración 12**).



Ilustración 12: Motor con escobillas de 30.000 RPM de eje corto de la marca Nimrod (7)

Recientemente entraron al mercado los motores sin escobillas (brushless) causando un gran impacto por sus especificaciones técnicas, ofreciendo rangos de velocidad iguales a los sin escobilla, pero manteniendo en todos ellos una alta relación de par. Además, al no requerir de escobillas para su funcionamiento, su mantenimiento se vuelve prácticamente nulo, ya que su sistema es controlado de forma digital (**Ilustración 13**).



Ilustración 13: Motor sin escobillas con velocidad variable 27/37 RPM de eje corto de la marca Nimrod (7)

En su inicio, causo problemas para combinarlos con unidades ETU, ya que entre sistemas no se entendían, pero esto fue solventado en poco tiempo por los fabricantes para no perder mercado, puesto que la industria tiende cada vez más a que desaparezcan los gatillos analógicos y el elevado precio de estos motores frente a sus antecesores, lo vuelve una gran barrera para el consumidor.

Estudiando el mercado y viendo la evolución y nacimiento de más marcas y empresas que invierten y se lanzan a producir estos motores, se puede apreciar en poco tiempo el abaratamiento de estos sin sacrificar las prestaciones, costando en un principio entre 180-240 \$ a poder encontrar hoy en día modelos por 100\$. Esta rápida evolución nos deja entrever cierta tendencia a igualar los precios de los motores con escobilla de alta gama en un corto-medio plazo, pudiendo llegar a rondar los 70-80 \$ en sus versiones más básicas, siendo estas superiores a su equivalente en coste de motores con escobillas.

- *Reductora de engranajes*

Una vez iniciado el movimiento por el motor, este se transmite al conjunto de engranajes reductores presente en el gearbox. Este conjunto está compuesto por tres engranajes, el primero conecta al motor con el segundo y este le transmite este movimiento al tercero, el cual conecta con el pistón.

En mercado podemos encontrar diferentes relaciones de reductora, nombrándose por la relación de vueltas en el primer engranaje equivalentes a una en el tercero, siendo los más comunes 12:1, 13:1, 16:1, 18:1. Cuanto mayor sea la relación, más lento resulta el ciclo, pero más par de fuerza tiene el sistema (**Ilustración 14**).



Ilustración 14: Conjunto de engranajes de relación 12:1 de la marca SHS (9)

En relación con los engranajes, encontramos el anti-reverse (**Ilustración 15**), esta pieza cumple la función de evitar que el sistema gire en sentido inverso al del ciclo entre disparo y disparo, principalmente para cuando se ajusta con pre-armado que el conjunto de engranajes tiene que bloquear el sistema con el muelle a medio comprimir, sin un sistema que bloquee el giro inverso de estos, la fuerza del muelle empujaría en cuanto el motor dejase de transmitir y podría provocar daños internos.



Ilustración 15: Anti- reverse para modelos V2 de la marca SHS (9)

Otro pequeño componente que encontramos dentro del sistema de engranajes sería el delayer, la función de este consiste en hacer retroceder el taper plate una vez por ciclo para introducir el siguiente proyectil dentro de la cámara de hop up, este se ubica adherido al tercer engranaje por la cara superior.

- *Sistema de compresión*

Una vez explicado de donde proviene la potencia en el sistema y como se transmite, lo siguiente es desarrollar el núcleo operativo de todo el sistema, el conjunto de compresión.

A fin de simplificar la explicación y centrarnos en casos que se trataran posteriormente, desarrollaremos este apartado únicamente en el caso de un sistema con gatillo electrónico GATE de sensor óptico.

Una vez transmitido el movimiento hasta el tercer engranaje, este engrana a la cremallera dentada de la parte inferior del pistón haciendo que se retraiga comprimiendo el muelle de su interior, ya que este se encuentra bloqueado por su otro extremo por la guía de muelle.

Durante el proceso de compresión, el delayer ubicado en el tercer engranaje, también retrae y libera el taper plate, el cual enlaza mecánicamente el movimiento del delayer y el nozzle, permitiendo así gestionar el proceso de alimentación de la munición entre ciclos.

Cuando el ciclo llega a la parte no dentada el engranaje, libera al pistón que es impulsado por el muelle comprimido durante la primera parte del ciclo, en este momento el delayer habrá cumplido su función y el nozzle estará en posición adelantada con munición cargada. Al soltar el pistón, este avanza dentro del cilindro donde la presión del avance provoca la expansión de la junta tórica de la cabeza de pistón y sellando el espacio del cilindro entre cabeza de pistón y cabeza de cilindro (**Ilustración 16**).

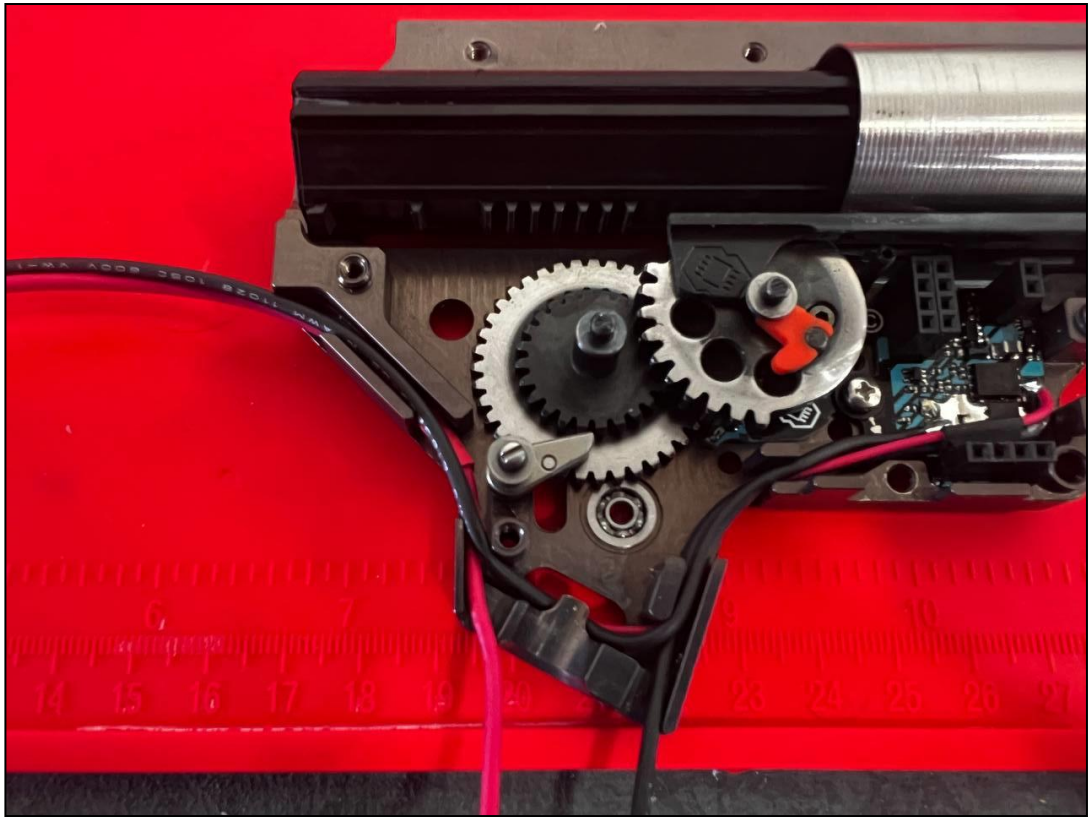


Ilustración 16: Apertura del Gearbox del proyecto donde se aprecia la parte del proceso de transmisión de movimiento entre engranajes y pistón (Producción propia)

Durante el avance dentro de la zona sellada, el pistón comprimirá el aire que se encuentra dentro de este espacio hasta que la presión generada sea suficiente para hacer pasar el proyectil por el sim de la goma de hop del principio del cañón. Después de este momento, tanto el empuje del aire en expansión como el empuje del aire movido por el pistón en avance, impulsaran el proyectil dentro del cañón, el cual, al encontrar la resistencia del sim de la goma por la parte superior al principio del cañón, tendrá un giro que producirá el efecto Magnus durante todo su vuelo fuera del cañón, prolongando así su alcance.

El final del ciclo lo marca el propio ETU según su programación, esto lo consigue mediante la lectura en tiempo real de los dientes que cruzan a través de su franja de sensores.

- *Conjunto precisión*

Entendemos como conjunto de precisión al grupo formado por goma de hop up (**Ilustración 17**), cámara de hop up y cañón. La goma de hop up cumple con las funciones de asegurar el bloqueo del proyectil cuando este es alimentado por el nozzle, asegurando el correcto posicionamiento, la generación de presión durante el ciclo de disparo y aportando una rotación al proyectil tras ser disparado para generar durante su vuelo el efecto Magnus.

La cámara de hop up tiene la función de mantener unidos tanto goma de hop como el cañón y permitir ajustar la cantidad de sim de la goma que asoma dentro del cañón para aumentar o disminuir la rotación en el disparo, lo cual es necesario cuando se varía de peso de proyectil, ya que, a más peso, más sim es necesario que asome para ofrecer una mayor rotación, puesto que al pesar más el proyectil, requiere de un mayor efecto Magnus para sostenerse en el aire.



Ilustración 17: Goma de hop up Guarder de silicona utilizada en el proyecto, se puede apreciar una protuberancia dentro de ella, es el sim (Producción propia)

Como último componente que interviene en el proceso de disparo, está el cañón de precisión, estos varían en mercado tanto en longitud, como en materiales y en diámetros internos. Las medidas de longitud más comunes se recogen entre 170 mm – 420 mm, en cuanto a materiales, los dos principales que podemos encontrar son latón y acero inoxidable. Por último, los diámetros internos que se

encuentras en réplicas comerciales van de 6,03 mm – 6,05 mm, pudiendo encontrar hasta de 6,01 mm – 6,12 mm en el mercado de after-market. Su función es prolongar el impulso del aire y guiar al proyectil.



Ilustración 18: Conjunto de precisión del proyecto (Producción propia)

1.6.2. ESQUEMA FÍSICO DEL FUNCIONAMIENTO DE UNA AEG

Tras describir superficialmente el funcionamiento mecánico presente en una réplica de airsoft, vamos a proceder a profundizar tanto en los cálculos que reflejan de forma numérica lo que está pasando dentro del objeto de proyecto como los cálculos realizados para las partes que se describen mediante teoremas físicos.

Para una mejor comprensión de los valores calculados, se compararán con los de una réplica de alto rendimiento por parte del preparador MG custom, ya que estas se consideran las mejores del mercado, podrán apreciarse las diferencias que presentan con el objeto de este proyecto y más adelante, las mejoras.

La **Tabla 1** de datos corresponde a los necesarios para realizar operaciones básicas dentro de los cálculos:

Tabla 1: Datos de partida de los cálculos

LEY DE HOOKE		infinity	omega
Modulo Elastico	E	397700.00 N/m ²	397700.00 N/m ²
Area contacto SIM	Asim	0.0000167 m ²	0.0000167 m ²
Espesor SIM y NUB	L	0.0030 m ²	0.0030 m ²
Asume SIM cañon	δ	0.0010 m ²	0.0016 m ²
Angulo contacto bb-SIM	β	45.00 °	45.00 °
Coefficiente rozamiento bb-cañon	μbb-cañon	0.15	0.15
Masa bb	Mbb	0.00036 Kg	0.00045 Kg
Diametro bb	Dbb	0.005950 m	0.005950 m
Relacion contacto bb-SIM	Sbb/SsIM	0.6	0.6
LEY DE BOYLE			
Presion inicial (atmosferica)	Patm	0.1013 N/mm ²	0.1013 N/mm ²
Volumen inicial cilindro	Vo	18240.12 mm ³	16015.71 mm ³
Presion sistema final compresion	Psf	0.1080 N/mm ²	0.1727 N/mm ²
Diametro Cilindro	Dc	23.80 mm	23.80 mm
Retraccion inicial piston	Lp0	41.00 mm	36.00 mm
Volumen conjunto C.C. y nozle	Vcc+nozle	750.00 mm ³	550.00 mm ³
2ª LEY DE NEWTON			
Espacio inicial para el muelle	LR	115.00 mm	115.00 mm
Peso piston	mp	0.03000 Kg	0.03000 Kg
Masa contrapeso	mcp	0.00800 Kg	0.02500 Kg
Espeso contrapeso	Lcp	0.00 mm	10.00 mm
Espesor rodamientos	Lrodamiento	5.00 mm	5.00 mm
Furza muelle en reposo	Freposito	48.00 N	60.88 N
Fuerza muelle en Max.retraccion	Fmax.retrac	82.40 N	86.80 N
Fuerza muelle final compresion	Fsf	64.00 N	80.00 N
Coefficiente rozamiento POM-metal	μPOM-metal	0.32	0.32
Peso especifico aire a 20º		11.81 N/m ³	11.81 N/m ³
Furza muelle cevado util	Fcegado util	52.80 N	52.80 N
Numero de dientes del piston	d piston	12	10
FLUJO DE AIRE A TRAVES DE BOQUILA			
Area boquilla C.C.	Aboquilla	16.62 mm ²	7.07 mm ²
Presion critica aire (relacion)	Pcritica aire	0.528	0.528
Constante del gas	R	29.2	29.2
Exponente adiabatico	k	1.4	1.4
Temperatura	T	20.00 °	20.00 °
Diametro boquilla C.C.	Dboquilla CC	4.60 mm	3.00 mm
Diametro cañon	Dc	6.03 mm	6.03 mm
Largo cañon	Lc	220.00 mm	220.00 mm
Densidad de aire	paire T=20º	1.204 Kg/m ³	1.204 Kg/m ³
Viscosidad cinematica	Vcinematica	0.0000151 m/s ²	0.0000151 m/s ²

o *Motor y engranajes*

En primer lugar, procedemos a realizar los cálculos referentes al conjunto de motor y engranajes a fin de obtener valores sobre la velocidad del ciclo y tiempos de operación concretos. En nuestro caso de estudio, partimos de un motor de 37.000 rev/min en combinación de unos engranajes de relación 16:1 y un short strock de 6 diente, 1 delantero y 5 traseros, dejando 10 dientes hábiles en el pistón:

V_m : velocidad del motor en rev/min

R_{eg} : relación de engranado

V_c : velocidad del ciclo en el tercer engranaje en rev/min

t_c : tiempo en realizarse un ciclo en el tercer engranaje medido en milisegundos

t_{cd} : tiempo de avance equivalente a un diente del engranaje tercero en milisegundos

d_p : número de dientes hábiles en el pistón

t_{re} : tiempo de re-engranado de pistón una vez se ha soltado este durante el ciclo en milisegundos

t_{rn} : tiempo para la apertura del nozzle tras soltar el pistón durante el ciclo en milisegundos



Ilustración 19: Despiece del proyecto donde se ven posicionados conjuntos de engranajes y motor (Producción propia)

De la formula obtenemos la velocidad a la que gira el tercer engranaje, teniendo en cuenta la pérdida por rozamiento del sistema que se refleja en el 0,9 multiplicando a la velocidad del motor en la formula, este valor se obtiene como simplificación presente en cálculos semejantes dentro del sector industrial.

$$\frac{V_m * 0.9}{R_{eg}} = V_c$$

En la formula obtenemos el tiempo que tarda el sistema visto desde el tercer engranaje en realizar un ciclo, expresado en milisegundos.

$$\frac{1000}{V_c/60} = t_c$$

El tercer engranaje, cuenta con media cara dentada como hemos explicado en apartados anteriores, en caso de ser completamente dentado, contaría con 30 dientes, por lo tanto, para obtener el tiempo de recorrido equivalente al paso de un solo diente, dividimos el tiempo de ciclo completo entre lo que sería el total de dientes de ser completamente dentado.

$$\frac{t_c}{30} = t_{cd}$$

En la formula obtenemos el tiempo que transcurre desde que el engranaje suelta el pistón hasta que vuelve a engranarlo para el siguiente ciclo, para ello, se tiene en cuenta que el punto de liberación del pistón desde el punto de vista de la posición, lo cual equivale en los cálculos a sumar 3 diente a los existentes.

$$[30 - (d_p + 3)] * t_{cd} = t_{re}$$

En la formula () obtenemos el tiempo que transcurre entre que el engranaje libera el pistón y el delayer hace contacto con el taper plate para abrir de nuevo el nozzle, para el caso de nuestro proyecto y nuestra configuración específica, se mide que este recorrido equivale a 3/8 del recorrido total del tercer engranaje.

$$t_c * \frac{3}{8} = t_{rn}$$

Con estos cálculos se obtiene los valores necesarios para definir los tiempos relevantes dentro del ciclo y saber la respuesta de tiro y cadencia que obtenemos con la configuración planteada.

	INFINITY	OMEGA
t _c	26.67 ms	28.83 ms
t _{cd}	0.89 ms	0.96 ms
t _{re}	15.11 ms	16.34 ms
t _{rn}	10.00 ms	10.81 ms

En la tabla comparativa, se aprecia como al reducir el número de dientes hábiles, podemos mantener unos valores de tiempos de ciclo semejantes o cercanos a los de una preparación infinity pero usando una relación de engranajes de mayor par frente al conjunto de motor de 30.000 rev/min y engranajes 12:1.

- *Muelle*

Continuando con el orden de procesos dentro del ciclo, ahora procederemos a obtenerlos valores de fuerzas ejercidas en los momentos relevantes durante el armado del pistón, que para nuestro proyecto hemos optado por adaptar un pistón de modelo SR25, que se diferencia del estándar por ser más largo y llevar una cremallera mayor, para que pueda usarse dentro de nuestro sistema.



Ilustración 20: Pistón modelo SR25 empleado en el proyecto (Producción propia)

L_{tm}: largo disponible entre la guía de muelle y el principio del pistón para albergar el muelle

L_p: largo del hueco interno del pistón teniendo en cuenta rodamientos y otros elementos que puedan restar espacio

L_m: largo del muelle

L_{retr}: recorrido de retracción que sufre el pistón durante el armado

L_{tmc}: espacio disponible en el punto más retrasado en el proceso de compresión del muelle para albergar el muelle comprimido

F_{rp}: fuerza ejercida por el muelle en posición de reposo, con el pistón en contacto con la cabeza de cilindro

F_{ar}: fuerza del muelle en la posición de mayor retracción dentro del ciclo del sistema

Las medidas de los espacios disponibles en los casos descritos, se tomaron con un calibre homologado directamente del gearbox simulando manualmente los momentos del ciclo, lo cual facilita la correcta obtención de los datos más allá del fallo descrito por el fabricante en el calibre.

En nuestro caso de estudio, se plantea el uso de dos muelles en serie de diferentes constantes elástica K , concretamente se estudió la instalación de 150 mm de un muelle 120M y 30 mm de un muelle 140M, ambos manufacturados por la empresa Guarder, la cual han facilitado los datos de la contante K y puesto a disposición programas internos que permiten introduciendo los valores del muelle y el incremento de longitud, obteniendo la fuerza de empuje en ese momento concreto.



Ilustración 21: Despiece de las dos caras del gearbox y los muelles 140M y 120M, siendo estos el corto y el largo respectivamente (Producción propia)

También mencionar que la reducción de espacio para el muelle en la omega se debe al contrapeso que alberga dentro para aumentar la masa del pistón hasta los 55 g.



Ilustración 22: Pesaje del pistón utilizado en el proyecto (Producción propia)

En la siguiente tabla compararemos los datos y consecuentes fuerzas que se obtienen durante el proceso de una Infinity y una omega:

	INFINITY	OMEGA
Ltm	110 mm	100 mm
Lp	60 mm	60 mm
Lretr	41 mm	36 mm
Ltmc	69 mm	64 mm
<hr/>		
Frp	48.00 N	60.80 N
Far	82.40 N	86.80 N

○ *Sistema de hop up*

Antes de continuar con los cálculos dentro del sistema de compresión, es necesario sacar el valor de presión necesaria que tiene que generar el sistema para hacer que el proyectil supere el sim de la goma de hop, expondremos las fórmulas generales pero daremos resultados concretos para el caso de munición de 0,45 g y hop ajustado para su correcto uso, En la comparativa de la Infinity se utiliza de caso de cálculo munición de 0,36 g, ya que es el máximo peso de munición con el que puede operar correctamente.

En primer lugar, se desarrolla un diagrama de fuerzas presente en dos momentos característicos del proceso de superar el sim, estos son el momento inicial y el momento donde el proyectil se sitúa geométricamente centrado con el sim.

La razón por la que no contemplamos momentos posteriores es porque una vez superado el centro geométrico, y al tener una sección semicircular, al pasar este momento la propia recuperación del material facilitaría el paso del proyectil y no requeriría de alguna fuerza externa, siendo todo momento posterior al mencionado, irrelevante para estos cálculos.

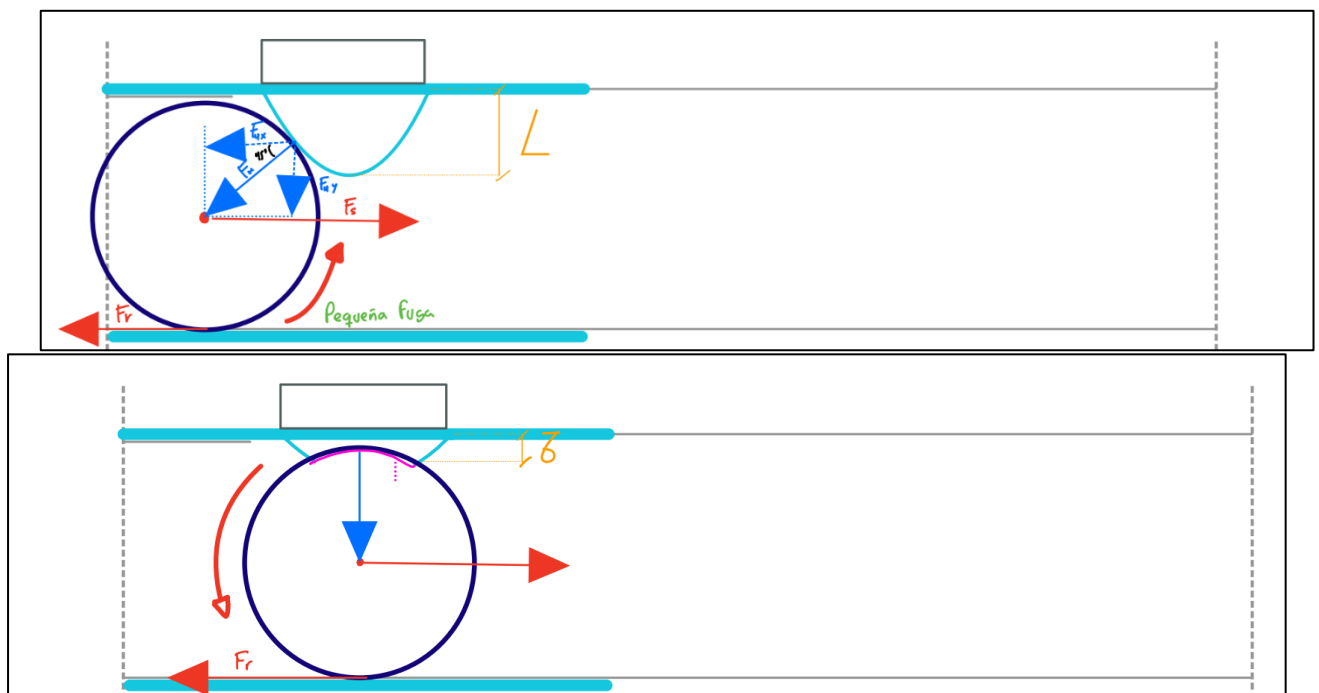


Ilustración 23: Diagrama de fuerzas entre el proyectil y el sim de la goma de hop up (Producción propia)

En el diagrama podemos observar que en el momento inicial tenemos F_h descompuesta en sus componentes X e Y, esta fuerza representa la reacción del sim ante el empuje de la bola causado por F_s , que es la fuerza generada por la presión del sistema. Respecto a la dirección de la fuerza de empuje, el contacto entre proyectil y sim produce una reacción perpendicular al plano de contacto, la cual está

a $\alpha=45$ grados del vector del empuje. También se tiene en cuenta la F_r que es la fuerza de rozamiento entre el proyectil y la superficie interna del cañón, estos están compuestos de PLA y acero inoxidable respectivamente, siendo el coeficiente de rozamiento entre ellos $\mu=0,15$.

Para estos cálculos haremos uso de las fórmulas explicadas previamente de Ley de Hooke y módulo de Young. Para el dato del módulo elástico $E=397700$ N/m² de la goma de hop up utilizada, compuesta de latex, se tomó dicho dato de un estudio externo que se realiza en condiciones y dimensiones semejantes al de este proyecto. (5)

$$F_s = F_r + F_{hx} = \mu * (\sin(\alpha) * F_h + m_{bb} * g) + \cos(\alpha) * F_h$$

$$E = \frac{F_h}{\varepsilon} = \frac{F_h}{A * \varepsilon}$$

Al relacionar las fórmulas obtenidas del diagrama de fuerzas y la Ley de Hooke obtenemos:

$$F_s = \mu * (\sin(\alpha) * E * A * \varepsilon + m_{bb} * g) + \cos(\alpha) * E * A * \varepsilon$$

Ahora sustituimos por los valores correspondientes al caso de la omega con munición de 0,45 g:

$$F_s = 0,15 * \left(\sin(45) * 397700 * 1,67 * 10^{-5} * \frac{0,0016}{0,003} + 0,00045 * 9,8 \right) + \cos(45) * 397700 * 1,67 * 10^{-5} = 2,88N$$

Para contrastar el razonamiento teórico, se realiza una comprobación practica colocando un proyectil en su posición de armado con el conjunto de cámara de hop y cañón fuera de la réplica y le aplicamos peso sobre él hasta que pasara el sim. Fueron necesarios 300 gr para conseguirlo, lo que equivale a 2,94 N.

Redondeando al primer decimal, los valores entre resultado teórico y experimental son lo suficientemente cercanos para considerar correcto el desarrollo los cálculos.

A continuación, compararemos los resultados entre Infinity y Omega:

	INFINITY	OMEGA
F _s	1.80 N	2.88 N
P _s	0.1080 N/mm ²	0.1727 N/mm ²

- *Conjunto de compresión: fase de compresión*

Dividimos los cálculos del conjunto de compresión en dos bloques, el primero se calcula los valores relevantes desde que el pistón es liberado hasta que alcanza P_s . Puesto que, en este bloque, el sistema se comporta como un cilindro sellado donde se comprime aire, aplicaremos las fórmulas de la Ley de Boyle.

En primer lugar, obtenemos la aceleración del pistón en el momento previo a iniciar el movimiento a_{p1} aplicando la segunda ley de Newton:

$$F = m * a \rightarrow F_{ar} = m_p * a_{p1}$$

$$a_{p1} = \frac{F_{ar}}{m_p}$$

Continuamos obteniendo el recorrido del pistón hasta alcanzar la presión P_s mediante la fórmula base de la Ley de Boyle: (2)

$$v_1 * P_1 = v_2 * P_2 \rightarrow v_1 * P_{atm} = v_2 * P_s$$

$$v_2 = \frac{v_1 * P_{atm}}{P_s}$$

$$L_{rc} = \frac{v_2 - v_{cc+nozle}}{S_{cilindro}}$$

Por último, con los datos ya obtenidos y fórmulas básicas del MRUA obtenemos la velocidad del pistón v_2 que nos será necesaria para próximos cálculos.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los cálculos de este bloque junto a la comparativa entre ellos respecto a la Infinity y la Omega:

	INFINITY	OMEGA
a_{p1}	2165.29 m/s ²	1575.05 m/s ²
V₁	18990.12 mm ³	16565.71 mm ³
V₂	9578.77 mm ³	6471.11 mm ³
L_{rc}	19.85 mm	13.31 mm
F_{fc}	64.80 N	80.00 N
a_{p2}	900.8 m/s ²	177.8 m/s ²
V₂	7.80 m/s	4.83 m/s

o *Conjunto de compresión: fase de cebado*

En este segundo bloque, el sistema actúa como un flujo de aire desde el punto de vista del nozzle, puesto que el proyectil ya ha pasado el sim y se encuentra en movimiento dentro del cañón, dejando de ser un sistema sellado. En este apartado estudiaremos y calcularemos las diferentes fuerzas que se ejercen sobre el proyectil durante su desplazamiento en el cañón.

En el primer momento de este desplazamiento, las fuerzas presentes sobre el proyectil siguen siendo las de presión, ya no solo la presión necesaria para el paso del sim, sino, que durante el proceso de esto, el pistón sigue en avance, por lo tanto la presión total del sistema transmitida al proyectil P_{st} será el sumatorio de la presión alcanzada en el primer bloque más la ejercida por el pistón en movimiento en ese instante.

Para obtener P_{st} primero obtenemos la fuerza de avance del pistón en ese momento del cálculo F_{pic} , con ella podemos sacar la presión que ejerce el pistón y sumarla a la presión conseguida dentro del cilindro en la fase anterior. Una vez obtenido P_{st} lo pasamos a magnitudes de fuerza para simplificar posteriormente los cálculos de velocidades del proyectil:

	INFINITY	OMEGA
F_{pic}	34.23 N	38.56 N
P_{st}	0.1850 N/mm ²	0.2594 N/mm ²
F_{st1}	5.14 N	7.21 N

Para el siguiente tramo de cálculos, obtendremos la velocidad del aire proveniente del sistema V_{as} con el objetivo de calcular la fuerza que este ejerce sobre el proyectil durante el resto de su recorrido de cañón, ya que tras pasar el primer momento, el sistema se abre a la presión atmosférica, haciendo así que la presión dentro del cañón decrezca rápidamente, lo cual simplificaremos en estos cálculos planteando que tras el primer momento, la fuerza sobre el proyectil ejercida por dicha presión generada en el cilindro durante la fase de compresión, es nula, quedando así únicamente la fuerza ejercida por el flujo de aire dentro del cañón provocado por la presión generada por el pistón en avance impulsando el proyectil. (6)

Para estos cálculos aplicaremos un desarrollo de cálculo equivalente al del flujo de aire a través de una boquilla. Al ser nuestro caso un flujo de aire rápido, lo consideraremos un sistema adiabático, partiendo de ello, primero obtendremos el valor de la relación de presión crítica para determinar que formula utilizar para obtener la rapidez de flujo de peso W en función de si el producto de P_2/P_1 es mayor o no a esta relación: (6)

$$Presion\ crítica = \left(\frac{2}{K+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,528$$

$$\frac{P_{atm}}{P_{st_{abs}}} = 0,28$$

Para el caso de nuestro proyecto, P_2/P_1 es menor que la presión crítica, por lo tanto, empleamos la siguiente formula de W : (6)

$$W = A_{boq} \sqrt{\left(\frac{2 * g * k}{k + 1} * (P_{st} * \gamma_1) * \left(\frac{2}{k + 1}\right)^{\frac{2}{k-1}}\right)}$$

Una vez obtenido W la relacionamos con el caudal Q : (6)

$$W = \gamma_2 * Q \rightarrow Q = \frac{W}{\gamma_2}$$

Despejamos la velocidad de flujo de ella y obtenemos el valor de la rapidez del flujo del aire por la cabeza de cilindro, lo que por definición nos daría el caudal de aire: (6)

$$Q = A_{boq} * v_{aire} \rightarrow v_{aire} = \frac{Q}{A_{boq}}$$

Con el caudal Q y la velocidad del aire V_{aire} obtenemos la fuerza que ejerce el aire sobre el proyectil $F_{aire-bb}$ despejando la siguiente fórmula: (6)

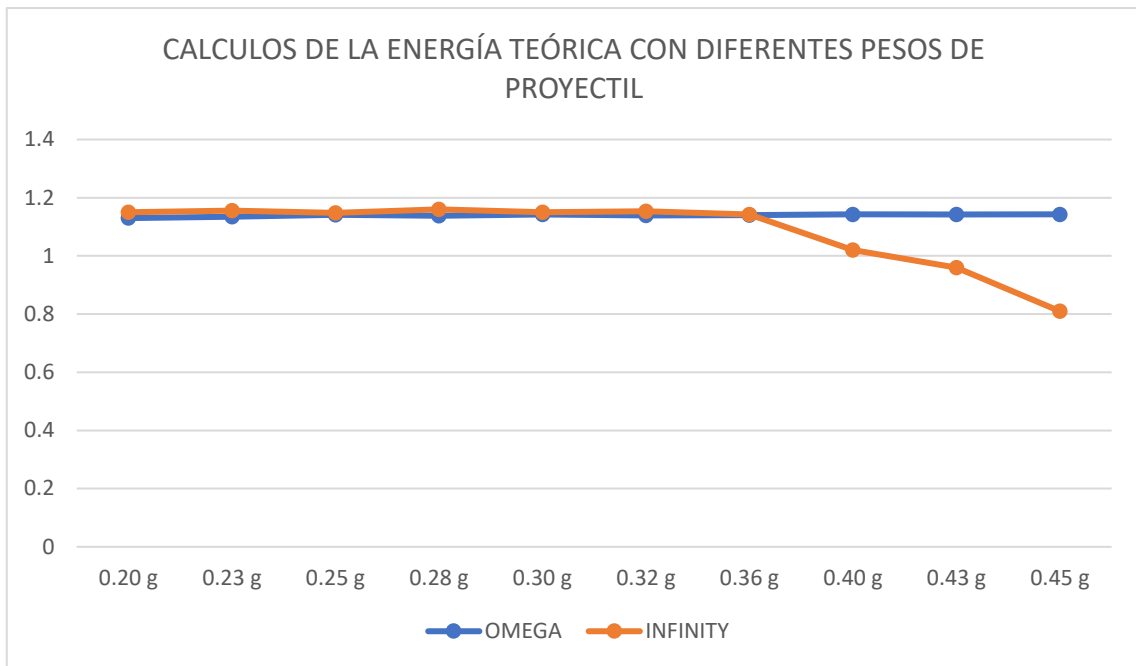
$$F_{aire-bb} = \rho * Q * v$$

Con esto finalizarían los cálculos sobre el bloque de cebado. que se reflejaran junto al comparativo con la preparación Infinity en la siguiente tabla:

	INFINITY	OMEGA
ap3	1260.0 m/s ²	1010.2 m/s ²
Vp3	5.99 m/s	5.91 m/s
Fpfc	47.88 N	60.61 N
Pstf	0.1076 N/mm ²	0.1362 N/mm ²
Fst1	3.07 N	3.92 N
W		
W	0.05265 N/s	0.03127 N/s
Vaire	127.75 m/s	151.25 m/s
Faire	3.20 N	1.91 N
Vbb		
Vbb	79.72 m/s	71.27 m/s
Ebb	1.143837535	1.143004804

Los últimos dos apartados de la tabla muestran como el proyecto da la energía límite con el peso máximo del proyectil. Uno de los objetivos principales de este proyecto es que, con la configuración estudiada y el rediseño de la cabeza de cilindro, se conserve el valor de energía indiferentemente el peso de proyectil que se use, siempre con el hop up ajustado a dicho proyectil, y que sin cambiar el ajuste de hop, con el menor gramaje de uso comercial, 0,20 gr, también de 1,14 julios en cada una de las comprobaciones.

Para mostrar estos datos de una manera más visual, se han realizado los cálculos anteriores para cada uno de los casos y se mostraran en la **Gráfica 1** junto a los de la Infinity, viéndose en el eje vertical la energía en julios y en el horizontal el peso de los proyectiles en gramos:



Gráfica 1: Gráfica representativa de los valores de energía calculados para los diferentes pesos de proyectil

En la gráfica podemos apreciar como la preparación Infinity, a pesar de aproximarse a la línea ideal que sería una recta de pendiente 0 en el valor de 1,14 Julios, esto solo sucede hasta 0,36 g de proyectil, el resto de proyectiles de mayor peso sufren una caída de Julios considerable, alejándose de la recta de los 1,14 Julios. En el caso de este proyecto, la Omega, no solo es más estable en este primer tramo inicial, sino que, al pasar la franja del 0,36 g, continúa siéndolo.

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1. FASE DE DISEÑO

2.1.1. Estudios previos

Tras 6 meses trabajando dentro de uno de los talleres más cualificados dentro del sector, y tener la posibilidad de trabajar y abrir más de 500 réplicas, empezó la idea de hacer un estudio de ingeniería inversa para llegar a la esencia desde el punto de vista físico y mecánico de que hace posible que una réplica de Airsoft haga lo que hace, y resolver la duda si lo está haciendo de la forma más optima posible.

Hablar sobre la “mejor” replica que se puede fabricar, es algo muy subjetivo, ya que es un producto que tiene como objetivo a jugadores con diferentes estilos de juego que dependiendo donde, como y sus preferencias, variaría cuál es su idea o concepto de “mejor”. En este proyecto, se quiso hacer énfasis a esos jugadores, a ese mercado que busca el límite de la mecánica dentro de una réplica, naciendo así la pregunta de: ¿hasta dónde se puede llegar actualmente y con los medios de los que se dispone en esta empresa?

Primero había que definir que rasgos nos marcarían estos “límites”, pensando en que busca el público objetivo de este producto y que buscaba, tanto yo como mecánico, como la empresa como marca. La conclusión a esto se tradujo en alcance y precisión, conseguir un producto que exprimiere al máximo el alcance y la precisión a la que se podía llegar con las limitaciones legales tanto en España como en sus campos de juego.

Una vez claro que se buscaba en este proyecto, estaba claro que para conseguirlo era necesario hacer posible el uso de gramajes altos en la munición, ya que su uso se ha demostrado que permite una mayor conservación de la energía durante su trayectoria alargando esta unos metros aun teniendo la misma energía de salida que otros gramajes inferiores. El problema era que a día de hoy, tanto en la empresa en la que me encontraba como en el mercado, solo se podía preparar replicas a 1,14 julios con uso de gramajes superiores a 0,32 g, para ir a potencia legal únicamente con el peso de bola seleccionado y con 0,20 g, limitando así la versatilidad de la réplica y de su público objetivo.

Al ver esa problemática en la tecnología actual, centrarse únicamente en alcance y precisión no era suficiente, ya que nos haría perder una gran parte del posible mercado. Por lo tanto, a los dos objetivos iniciales había que añadir la versatilidad, entendiendo esta como la posibilidad de usar cualquier gramaje de proyectil sin que suponga un problema con la réplica a nivel mecánico o sufra alteraciones en su potencia.

Con los objetivos encima de la mesa y los conocimientos adquiridos en la empresa, se procede a investigar más en profundidad como alcanzarlos.

En primer lugar, se detectó que dentro del ciclo que se produce en el conjunto de compresión, existían dos fases:

- Fase inicial de compresión: en ella observo que su objetivo es generar presión en un sistema cerrado, donde lo importante es evitar que el pistón pierda inercia.
- Fase final de cebado: en esta fase el sistema ya se ha abierto y la función del sistema es impulsar el proyectil con el aire que mueve el pistón, siendo en esa parte más necesaria velocidad por parte del pistón.

Con estas observaciones presentes, el primer paso fue buscar la forma de que el pistón pudiese trabajar en cada fase de la forma correcta.

En el caso de la fase uno, observe que en una réplica de mercado convencional el pistón suele pesar entre 25-30 g, y no son capaces de mover pesos de proyectil superiores a 0,28 g sin ver reducida la energía del proyectil por debajo del 1,14 J y pudiendo sufrir averías mecánicas. En el caso de la mejor preparación de la empresa en la que me encontraba, se le añadía peso hasta los 38-40 g, y ampliaba el rango de gramajes de uso hasta los 0,36 g.

En vista de que aumentar el peso parecía que aumentaba su capacidad de poder mover mayor peso en los proyectiles, realice diversas pruebas añadiendo peso al pistón hasta un máximo de 70 gr, que el límite por espacio físico dentro del disponible para poder añadir material.

Los resultados de las pruebas dieron conocer que, a mayor peso, más se ralentizaba el pistón, haciendo necesario utilizar muelles de mayor dureza para que la reducción de velocidad en el ciclo no provocases atranques o averías derivadas de un mal engranado.

En el caso de la segunda fase, razone que la pérdida o caída de la energía con el aumento del peso del proyectil, podía deberse a que la velocidad del aire era insuficiente durante su recorrido por el cañón para conseguir los 1,14 J en gramajes superiores a 0,28 g.

Durante las comprobaciones, a pesar de verse reducida la velocidad del pistón al aumentar su peso, los resultados eran más favorables de cara a gramajes por encima de los 0,28 g, pero la caída de potencia se reflejaba en los gramajes bajos.

Otro factor que influye en gran medida era la longitud del cañón, así como su diámetro, aunque en menor medida. Se buscan largos inferiores a 240 mm para reducir la energía que recibe del sistema los proyectiles ligeros y así conseguir aplanar la gráfica de energías entre pesos de proyectil, pero solo se conseguía en pequeños rangos de estos.

2.1.2. Fase de prototipado

En los primeros modelos buscaba cumplir de forma toscas las premisas en cada una de las fases, aumentando el peso del pistón mediante un contrapeso de latón de 15 mm de longitud introducido dentro del propio pistón, el cual aumentaba en 20 g el peso del pistón, aunque reducía el espacio para el muelle considerablemente, no permitiendo dejarle un recorrido completo, así que le quite 4 dientes al recorrido del pistón a modo de compensación. También se optó por un muelle 130M Guarder para evitar ese frenado en la primera fase con un muelle mayor de lo habitual para potencias de 1,14 J.

De cara a la segunda fase, y basándome en los principios de continuidad y Bernoulli, considere si reducir el diámetro del cuello de la cabeza de cilindro, no afectaría a la generación de presión de la primera fase, y proporcionaría una mayor velocidad de aire fluyendo por el cañón. También, desde el punto de vista mecánico, esta reducción de diámetro ofrecía la posibilidad de añadir al diseño una junta tórica en la parte superior del cuello que proporciona una mayor estabilidad y centrado del nozzle, gracias a que solventa holguras comunes por las medidas de las piezas de mercado, solucionando así problemas de alimentación que solían darse durante los montajes de la preparación. Estos problemas venían por la presión del muelle del cargador sobre el nozzle cuando el cargador estaba a máxima capacidad, dicha presión sumado a la holgura entre nozzle y cuello de cabeza de cilindro, provocaba que este se levantara y descentrara respecto a la cámara de hop durante el ciclo de alimentación, derivando en doble alimentaciones, atranques, inconsistencia entre disparos entre otros problemas (**Ilustración 24**).

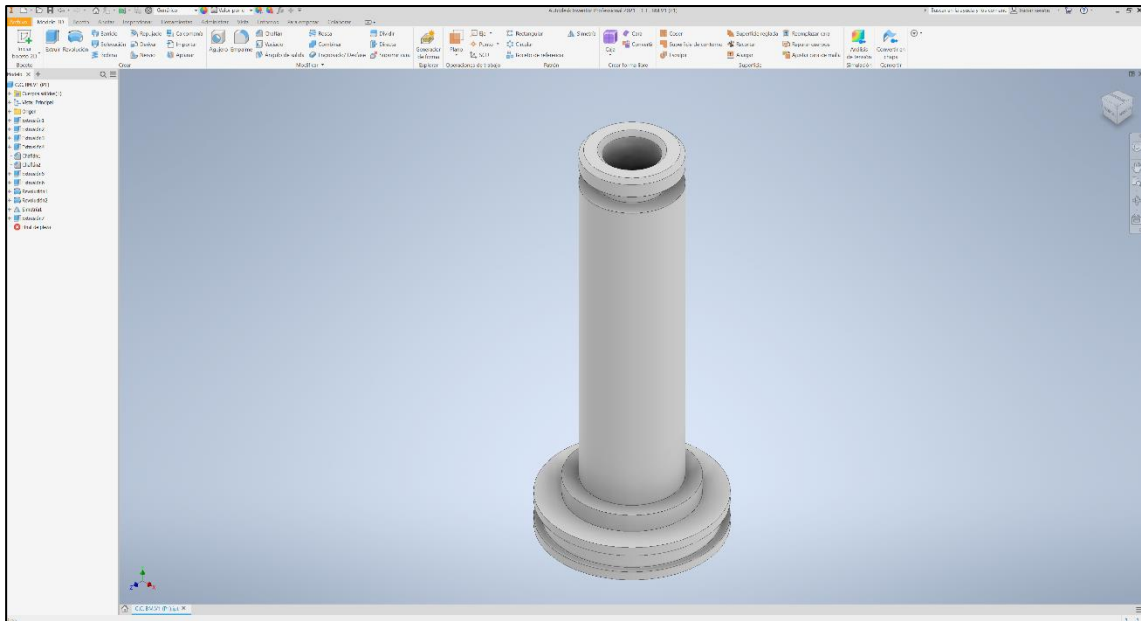


Ilustración 24: Modelo del prototipo del cuello de la cabeza de cilindro hecho a 3D en Inventor

Tras fabricar un prototipo del cuello de la cabeza de cilindro e instalarlo junto al resto de piezas modificadas para probar si las teorías que habían planteado eran correctas, note un ligero aumento de la estabilidad en los disparos y mejora en la agrupación, también tras hacer comprobaciones con todos los gramajes, se vio que a pesar de no aplanar la gráfica completamente, esta había reducido su pendiente frente a los datos de la Infinity, aunque a diferencia también de ella, la variación en la gráfica la obteníamos en forma de julios por encima 1,14 J entre 0,32 g y 0,40 g.

Con los datos recogidos en el prototipo, seguí con la investigación y modificando el diseño del cuello de cabeza de cilindro, así como ajustando la fórmula global del conjunto de piezas hasta obtener el modelo final que es el expuesto en el apartado de cálculos de forma detallada.

2.2. PRUEBAS DE CAMPO

2.2.1. PRUEBA DE CORRECTO CICLO DESDE EL ENFOQUE DE REGLAJE MECÁNICO

La primera comprobación que se realiza en el montaje de una réplica, es coloquialmente conocida como “ la prueba de sonido”, haciendo referencia a la comprobación mediante la audición de que el reglaje interno está correctamente hecho, de ser así, el sonido durante los ciclos será generalmente el de impacto del pistón contra la cabeza del pistón, sin presencia de estridencias agudas provenientes de los engranajes o el motor, las cuales nos darían información sobre un mal ajuste de engranajes, roces internos o una errónea altura de motor.

La primera parte de esta comprobación se realizará sin la parte del superior del cuerpo y tapando parcialmente la parte frontal del nozzle para evitar un estrés excesivo al provocar una situación de disparo en vacío.

Para la realización de esta prueba, programaremos la réplica sin pre-armado para en caso de algún fallo de montaje o error de reglaje, se minimicen o eviten los daños internos ante un mal ciclo. En el caso que nos atañe, se utilizan unos engranajes de relación 16:1 y un motor de 37.000 rev/min, por lo tanto, las pruebas de ciclo empezaran limitando la velocidad de este a un 80 % y tras comprobar que cicla correctamente. Una vez programados estos parámetros, partiendo de una altura de motor media sobre el recorrido completo, se procede a realizar disparos de comprobación y ajustando la altura hasta encontrar la posición de motor donde el sonido es lo más cercano posible al buscado, en caso contrario, se procede a su apertura y ajuste del reglaje de los engranajes, basándose en las marcas visuales que habrán dejado el incorrecto ajuste. Tras encontrar la altura correcta, se procede a aumentar sistemáticamente en tramos de un 5% la limitación del motor hasta llegar al 100% sin detectar ningún fallo.

Tras confirmar un correcto funcionamiento mediante la audición nítida de un sonido seco de impacto, se activa la función de pre-armado y se ajusta hasta que el ciclo se detenga con el nozzle en posición de avance, esto asegura una correcta alimentación durante el funcionamiento.

2.2.2. PRUEBA DE CONSERVACION DE ENERGIA DEL PROYECTIL

En esta comprobación vamos a realizar pruebas enfocadas a medir la energía del proyectil a la salida del cañón, utilizando todos los rangos de pesos de proyectil del mercado, y afirmando que en todos ellos la energía de salida es de 1,14 J.

Para la comprobación de cada peso de bola, primero, se ajustará el hop up para que el vuelo de proyectil sea el adecuado, entendiéndose por adecuado el ser tenso y con una subida no superior a 30-40 cm. Tras asegurar estas condiciones, se procede a pesar con una pesa de precisión 15 proyectiles de 0,20 gramos de la marca RACCOON PREMIUM de una bolsa recién abierta, y se procede a cargar estos 15 proyectiles en el cargador y a medir la velocidad de salida del proyectil por la réplica mediante un cronógrafo de uso específico para airsoft de la marca ACETECH.

Según fabricante, este cronógrafo tiene un fallo de del 5%, esto se tendrá en cuenta para la valoración de los resultados, puesto que es el aparato más preciso al que se ha podido tener disposición.

Se toman los valores de las 15 mediciones y se coge una media de los resultados, siempre y cuando la variación entre ellos no supere entre los 2-5 fps, en caso de ser mayor de diferencia, se tomaría por no válida y habría que revisar la mecánica para encontrar el fallo que provoca la inconsistencia de la réplica.

Este proceso se repite con los proyectiles de 0,23 g -0,25 g-0,28 g-0,30 g-0,32 g-0,36 g-0,40 g-0,43 g-0,45 g; a diferencia que, en todos estos casos posteriores, sin modificar los ajustes de hop up, también se tomaran las medidas del cronógrafo con proyectiles de 0,20 g. El motivo de esta variación en la comprobación se debe a la necesidad de asegurar al cliente que indiferentemente las reglas de medición del campo, cumpla siempre con la normativa del mismo.

Se considerará satisfactoria la prueba cuando tras obtener todos los resultados se estime que la energía en todos los casos se aproxima a 1,14 julios, no superando la variación entre mediciones de diferente peso el 5%, considerándose este el límite para calificar como nula la comprobación y realizar una revisión mecánica del proyecto.

2.2.3. PRUEBAS DE ALCANCE Y PRECISIÓN

Esta prueba tiene como objetivo la medición de los siguientes parámetros, teniendo de ante mano presente que todos ellos se miden en condiciones ideales, entendiendo estas la realización de las pruebas de tiro en una nave cerrada, sin condiciones de aire o desniveles y a temperatura dentro del rango de los 15-25 °C. También se revisa que el peso de los proyectiles sea el correcto y el mismo y que su diámetro lo sea también.

- **Alcance efectivo:** Entendemos como alcance efectivo la distancia a la cual el proyectil no ha caído por debajo de la altura inicial de disparo más de 20 cm y es capaz de impactar a un objetivo del tamaño de un torso humano adulto (100 cm X 60 cm) un promedio superior a 8 de 10 disparos.
- **Alcance máximo:** Entendemos por alcance máximo del proyecto a aquella distancia, sin condicionantes de altura de impacto de proyectil o inclinación de la réplica, a la cual es capaz de impactar a un objetivo del tamaño de un torso humano adulto (100 cm X 60 cm) un promedio superior a 5 de 10 disparos.
- **Agrupación:** Entendemos por agrupación a la superficie que en marca en una diana un conjunto de impactos realizados con la réplica completamente estática y fija y sin una diferencia entre disparos mayor a 5 segundos, para simular una situación real de disparos continuados durante el juego y no dar lugar a variaciones internas como pueden ser destensado de hop y ciclos irregulares.

La diana en cuestión será de cartón blando con pocos pliegues interna, esto facilitara la comprobación del impacto a cuanto más nos alejemos en distancia, ya que, a pesar de no atravesarlo, el fino relleno provocará que el más mínimo impacto deje una hendidura en este que permita visualizar el punto de impacto. Conjuntamente a este sistema, la réplica llevar incorporada una cámara con objetivo de aumentos que grabara toda la sesión para poder revisar algún impacto dudoso.

Para esta comprobación, al igual que en las anteriores, se revisará el total de los proyectiles, en este caso 10, de los diferentes gramajes, y se realizará la prueba a diferentes distancias para obtener datos de situación más comunes de los diferentes tipos de juego o terrenos. Colocaremos las dianas a 20m-40m-50m, estas distancias las consideramos el estándar para uso de replicas comerciales, así obtenemos una comparativa frente a un producto de mercado, posteriormente realizaremos la prueba de agrupación a la distancia obtenida como alcance efectivo en pruebas anteriores.

En caso de obtener un impacto anómalo o excesivamente desagrupado respecto al resto, se repetirá la prueba de nuevo, si esta situación persiste, se tomará la prueba como no valida y se procederá a la revisión mecánica del proyecto para encontrar el motivo de la desviación puntual de proyectiles, así como revisar el conjunto de precisión para descartar un desperfecto de fabricación de alguna de las piezas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

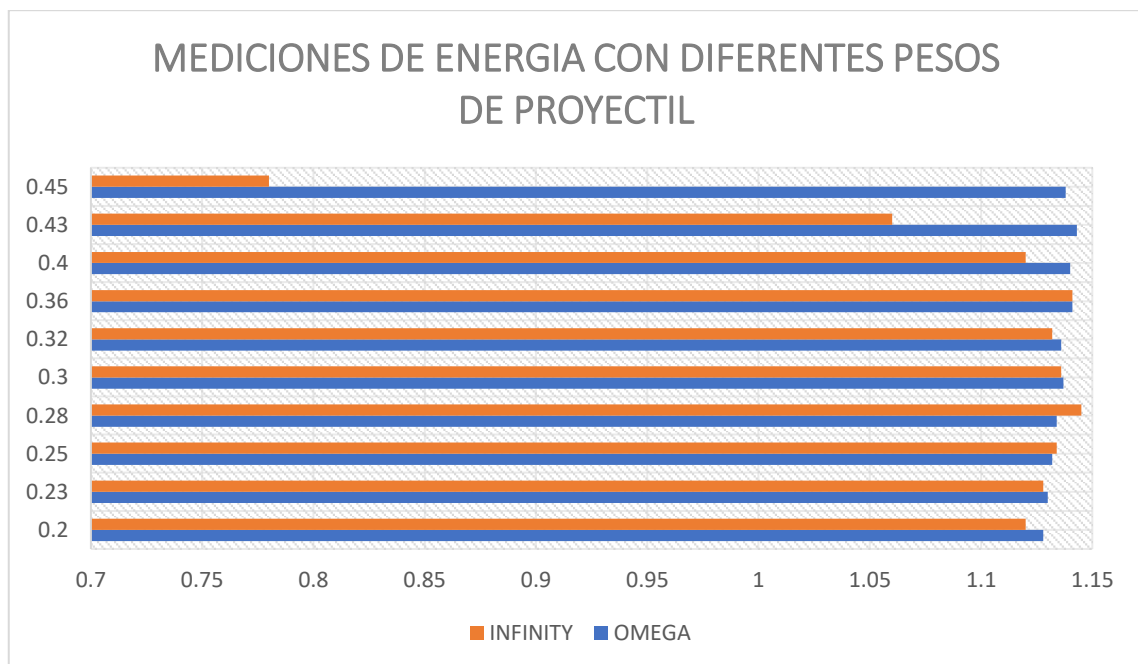
En este apartado del proyecto discutiremos los resultados obtenidos sobre las pruebas expuestas en el apartado de pruebas de prototipos.

3.1. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE REGLAJE MECÁNICO

Tras algunas rectificaciones en la altura del primer engranaje, los resultados de sonido y sinergia mecánica son más que satisfactorios. A causa de que estos resultados principalmente se adquieren de manera auditiva, no es posible mostrarlo en la memoria, pero se deja registro de que salieron más que favorables, la única diferencia frente a una Infinity, es un ligero silbido dentro del proceso consecuencia de la reducción del diámetro de la cabeza de cilindro, siendo este no relevante para detectar posibles fallos mecánicos.

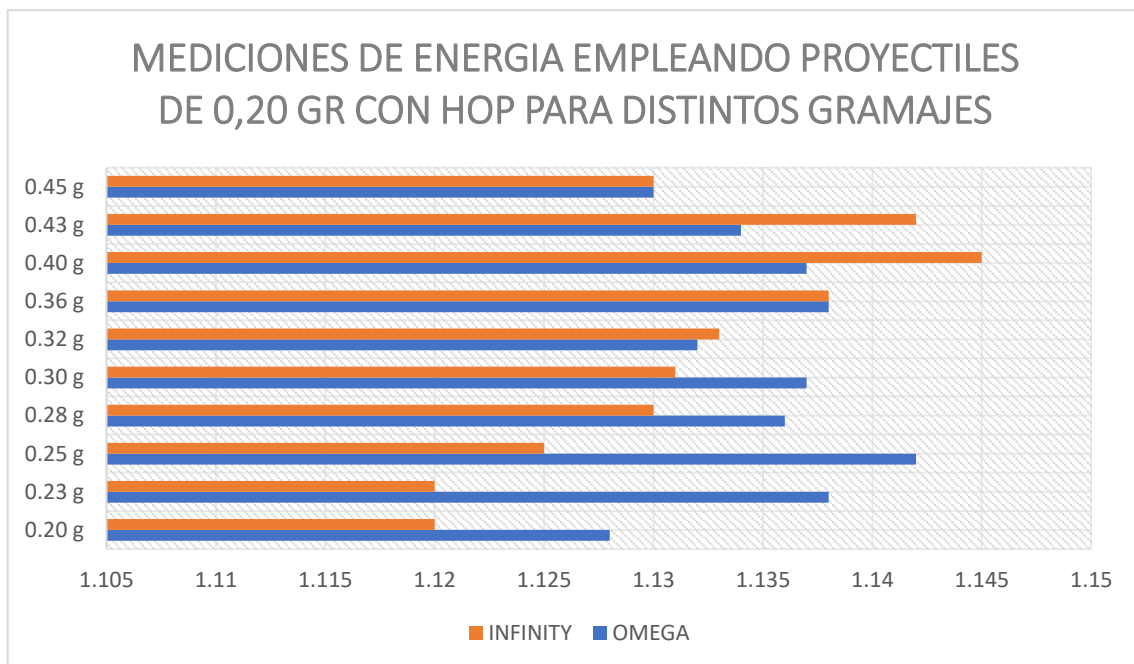
3.2. RESULTADOS PRUEBA DE CONSERVACION DE ENERGIA ENTRE PROYECTILES

Para mostrar estos resultados, se utilizarán la **Gráfica 2** y **Gráfica 3** donde se mostrarán en una de ellas a conservación de julios entre los diferentes pesos de proyectil y otra en la que se mostrará la energía obtenida con el hop up ajustado para los diferentes pesos de proyectil, pero utilizando proyectiles de 0,20 g. En ambas graficas encontraremos el eje vertical en unidades de gramos y el horizontal en julios. Se mostrará un comparativo con la preparación Infinity.



Gráfica 2: Resultados de las mediciones de potencia, en cronógrafo, de diferentes pesos de proyectil disparados por una Infinity y por una Omega

En los resultado de la **Gráfica 2** se aprecia que la variación de energía en los proyectiles de 0,20 g-0,36 g es muy similares, apreciando una ligera mejor conservación en el caso de la Omega, no cruzando en ninguno de los casos la frontera de los 1,14 J, mientras que en la Infinity si se da este caso en proyectiles de 0,28 g. Respecto a los proyectiles entre 0,40 g – 0,45 g, claramente se aprecia una caída gradual en la energía de los proyectiles disparados por la preparación Infinity, llegando a caer por debajo de los 0,8 J en el proyectil de mayor peso, en el caso de la Omega, los niveles de variación se mantienen estables respecto a los pesos de proyectil anteriores, pudiendo determinar que hablando del rango completo de pesos de proyectil, este proyecto obtiene unos valores más estables en concepto de conservación de energía entre pesos de proyectil.



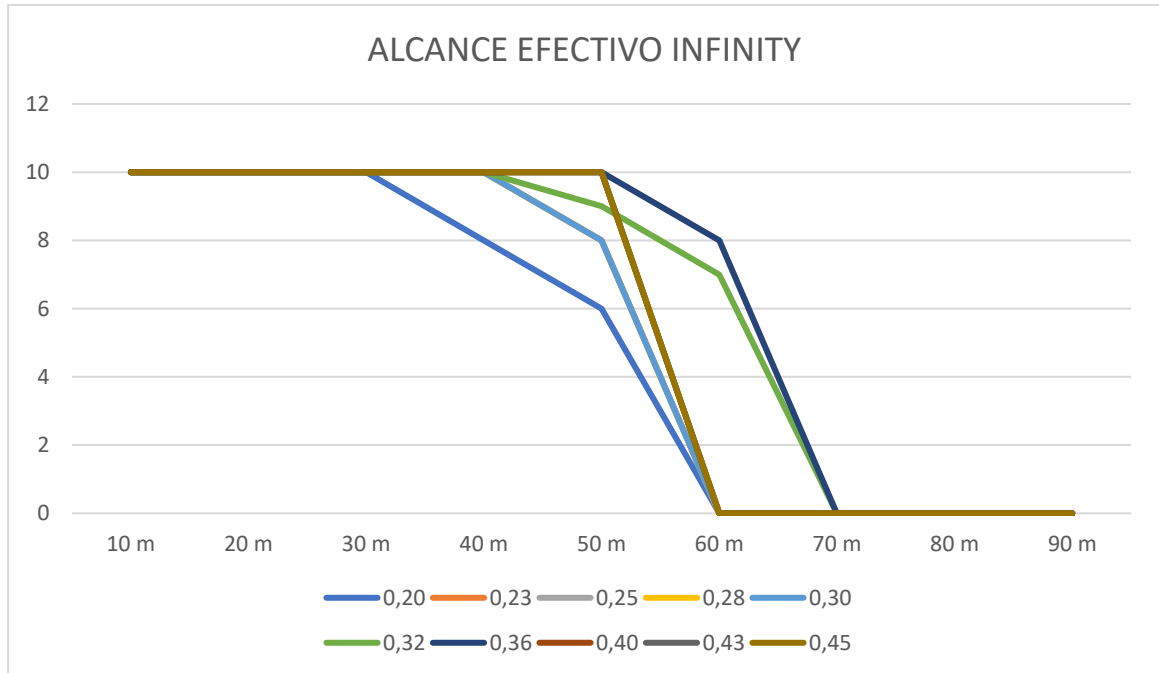
Gráfica 3: Resultados de las mediciones de potencia, en cronógrafo, de proyectiles de 0,20 g disparados por una Infinity y por una Omega con hop up ajustado para los diferentes pesos de proyectiles

En los resultados de la **Gráfica 3** lo que nos interesa resaltar es que no exceda los 1,14 J por motivos de posible método de medida en algunos campos de juego, teniendo esto en cuenta, procedemos a las valoraciones. En la gráfica se puede apreciar que, en el caso de la Infinity, en los pesos de 0,40 g y 0,43 g la energía del proyectil de 0,20 g excede el límite de potencia, en cuanto a la Omega, sufre un pequeño exceso de energía en el peso de 0,25 g.

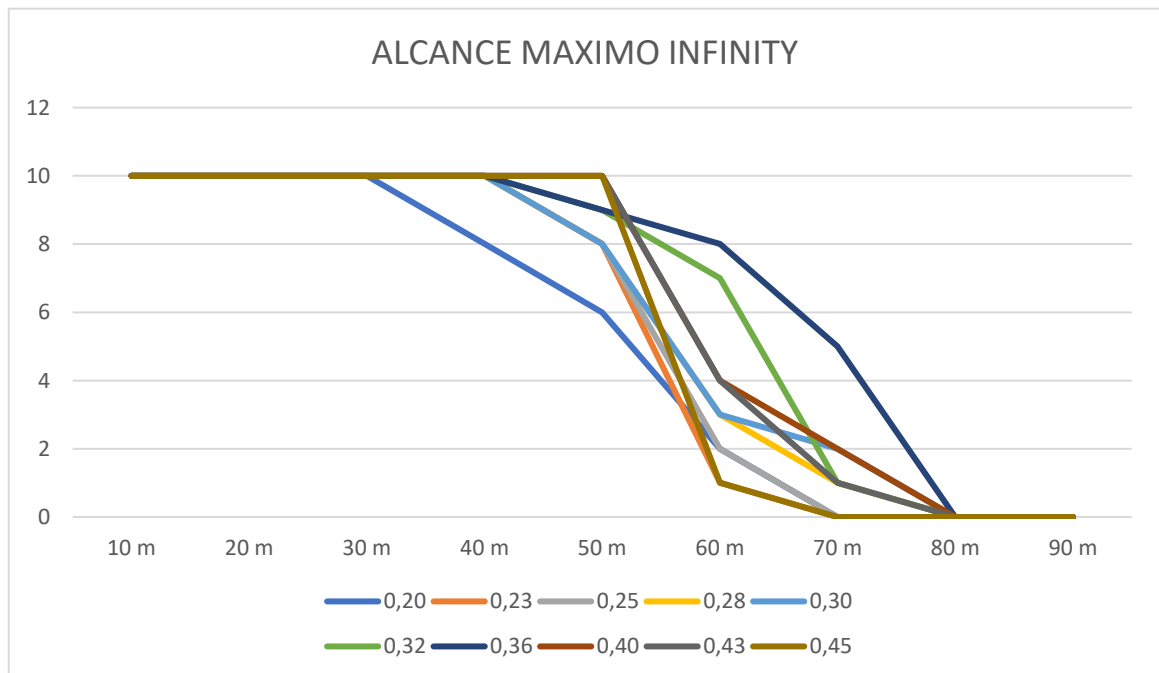
Para el caso de la Infinity no supone un problema este dato ya que el propio fabricante deja estos gramajes fuera de rango de uso recomendado, por lo tanto, el usuario no debería usarlos, sin embargo, en el caso de la Omega sí debería ser un rango de uso el 0,25 g, y a pesar de que el exceso es bastante pequeño, no llegando a suponer un problema para el usarse en los campos de juego debido al margen que suelen dejar, si es un punto a revisar del proyecto para mejorar.

3.3. RESULTADOS PRUEBAS DE ALCANCE

Para mostrar estos resultados, se muestra en el eje vertical la cantidad de impactos en la diana sobre 10, y en la horizontal los metros a los que se realizan los impactos. Estos datos se representarán para cada uno de los pesos de proyectil.

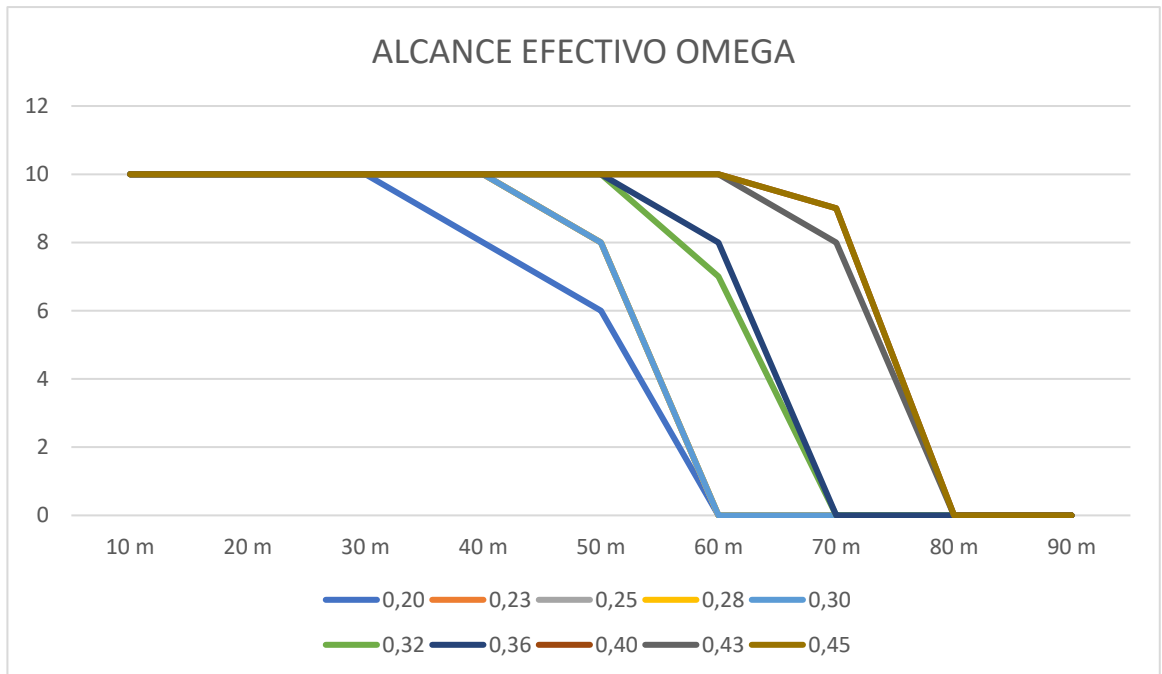


Gráfica 4: Valores medidos del alcance efectivo de una Infinity

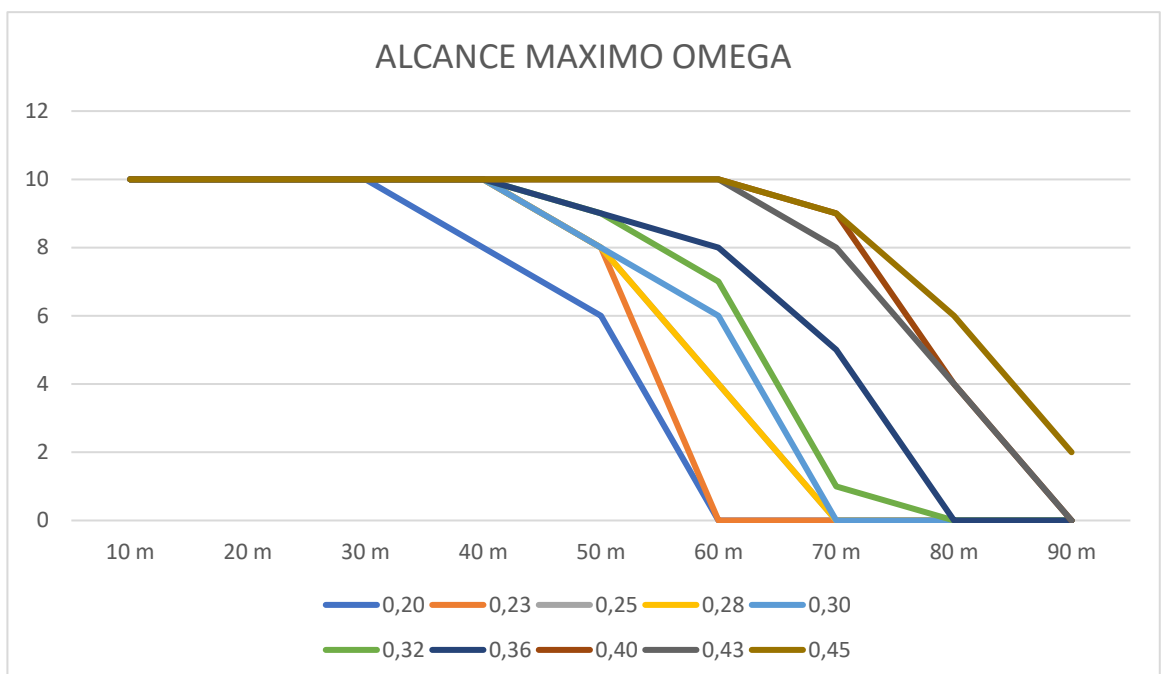


Gráfica 5: Valores medidos del alcance máximo de una Infinity

En los resultados obtenidos en la **Gráfica 4** y **Gráfica 5** se determinamos, según criterio establecido, que el alcance efectivo de mayor rango en la preparación Infinity es de 62 m con un peso de proyectil de 0,36 g y el alcance máximo es de 71 m con el mismo peso de proyectil que el efectivo.



Gráfica 6: Valores medidos del alcance efectivo de una Omega



Gráfica 7: Valores medidos del alcance máximo de una Infinity

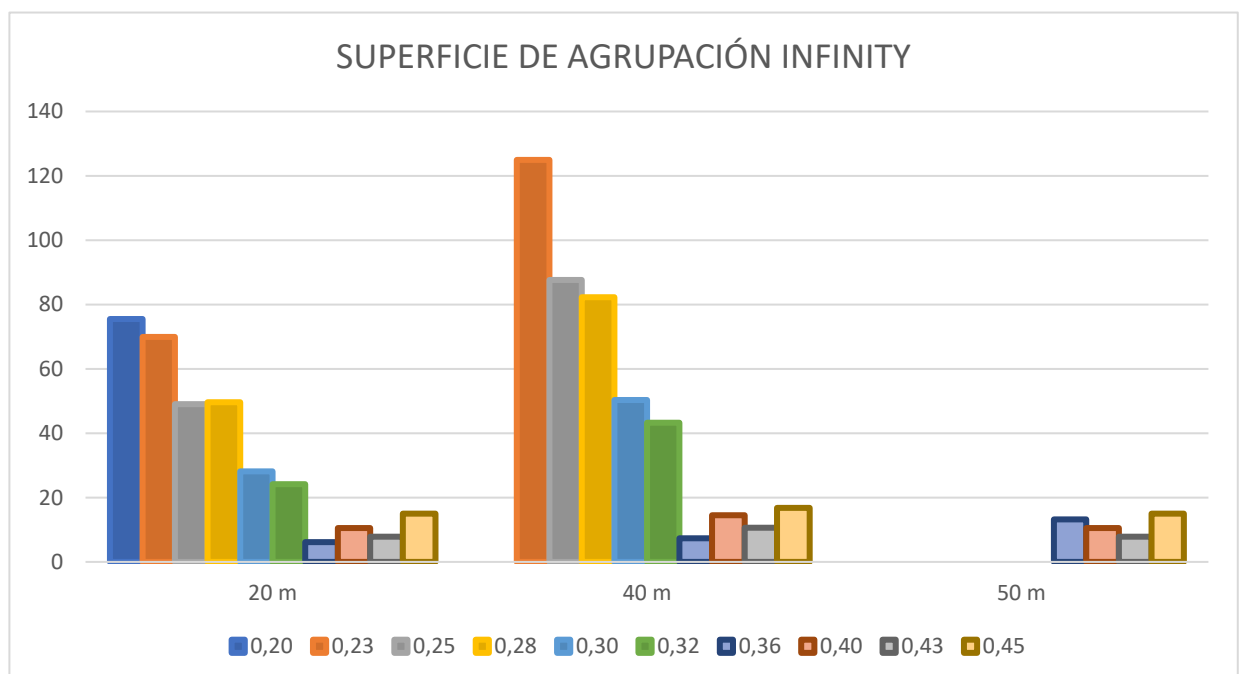
En los resultados obtenidos en la **Gráfica 6** y **Gráfica 7** se determinamos, según criterio establecido, que el alcance efectivo de mayor rango en la preparación Omega es de 73 m con un peso de proyectil de 0,45 g y el alcance máximo es de 84 m con el mismo peso de proyectil que el efectivo.

Comparando ambos conjuntos de datos, se concluye que el aumento de peso en el proyectil proporciona un mayor alcance efectivo y máximo, por lo tanto, al estar la Omega preparada para poder operar con el mayor peso de proyectil según normativas de los campos y leyes nacionales, es capaz de alcanzar no solo un mayor rango de alcance que la preparación Infinity, sino también, marcar el mayor alcance obtenido de una réplica de fusilero a 1,14 J.

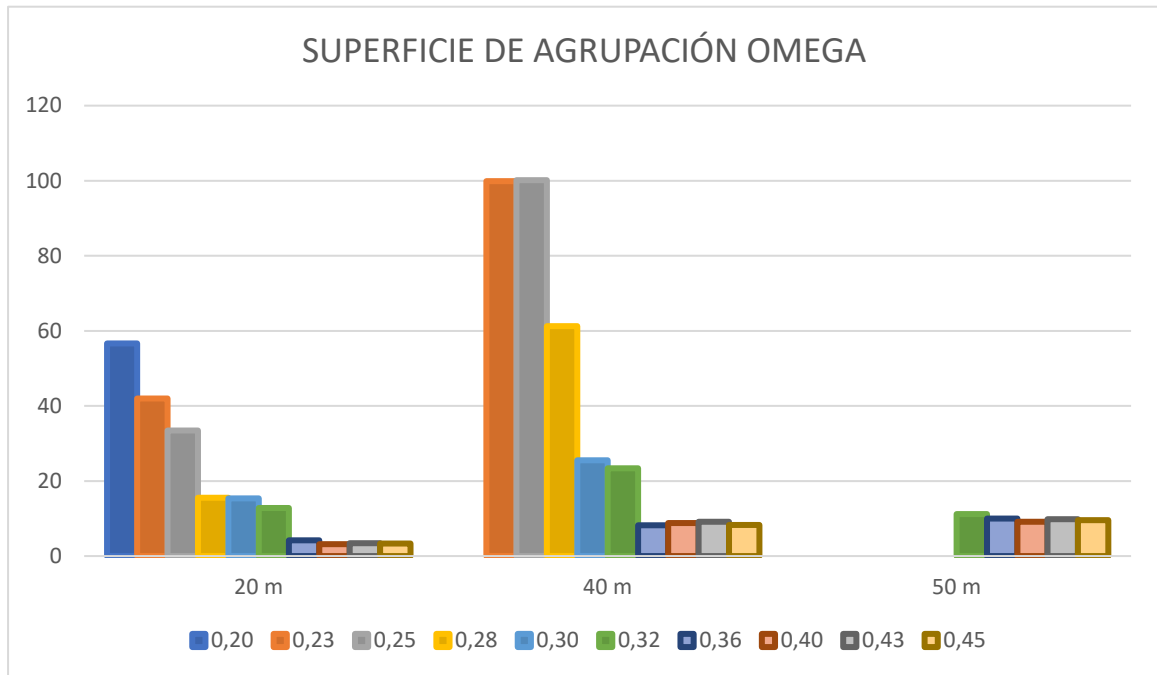
Otra apreciación que se puede sacar de las gráficas, es que, en el caso de la Omega, los trazos de los datos son más homogéneos entre gramajes, a pesar de reducir el alcance conforme se reduce el peso del proyectil, la curva que dibuja es similar en todos los casos. En el caso de la Infinity podemos apreciar un conjunto de datos más caótico e irregular, lo que revela inconsistencias de funcionamiento según que peso de proyectil se utilice, esto es esperable ya que este producto fue pensado para operar a un peso de proyectil de 0,36 g en todo momento, dejando fuera de uso el resto de pesos.

3.4. RESULTADOS PRUEBAS DE PRECISIÓN

Para mostrar estos resultados, mostrando en el eje vertical los cm^2 , y en la horizontal los metros a los que se realizan los impactos. Estos datos se representarán para cada uno de los pesos de proyectil.



Gráfica 8: Valores de superficies de agrupación a diferentes distancias con diferentes pesos de proyectil disparados por la Infinity



Gráfica 9: Valores de superficies de agrupación a diferentes distancias con diferentes pesos de proyectil disparados por la Omega

En la **Gráfica 8** y **Gráfica 9** solo se representan las superficies de agrupación de los proyectiles que han impactado los 10 disparos dentro de los márgenes de la diana, en caso de no ser así, se les excluye de los datos de agrupación.

Matizar que para la mejor comprensión de las gráficas, cuanto menos sea la superficie, menor es la dispersión entre disparos y mayor es la agrupación. En la gráfica de los resultados de la Infinity, se aprecia como las barras de datos forman una especie de depresión en a la zona central, esto quiere decir que obtenemos una agrupación mayor en gramajes intermedios que en los más bajos o incluso los más altos, mientras que, en la gráfica de la Omega, estos datos crean una pendiente decreciente, mostrando que conforme se aumenta el peso del proyectil.

La teoría nos dice que aumentar el peso de proyectil aporta un aumento del alcance y la precisión, por lo tanta, se toma estas pautas para la interpretación de las gráficas. La Omega no solo muestra valores menos generales en las superficies de agrupación, sino que prácticamente cumple con la premisa de que el aumento de gramaje conlleva un aumento de la agrupación.

4. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos por la parte de pruebas de campo de este proyecto, y tras analizarlos, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- ❖ La implementación del nuevo diseño de cabeza de cilindro con el asentamiento de junta tórica en el extremo del cuello y la reducción de su diámetro interno, a mostrado una mejora mecánica notable en la alimentación de la munición, así como el centrado del nozzle respecto al conjunto de precisión durante cada ciclo, que en los resultados se ha traducido en una mayor consistencia en los disparos.
- ❖ La reducción de volumen de aire dentro del sistema de compresión por medio de reducir la cantidad de dientes en la cremallera a modo alternativo al convencional de acortar el largo de cañón, sumado al resto de variaciones en la fórmula del sistema y el aumento de peso en el pistón, han mostrado dar mejor resultado de cara a la estabilidad de energía entre diferentes pesos de proyectil, así como el poder usar todo el rango de pesos de proyectil existentes en el mercado español.
- ❖ Reforzar y afianzar el concepto de que el aumento de peso de proyectil proporciona un mayor alcance y una mayor agrupación.
- ❖ La implementación de dos muelles en serie de diferentes durezas proporciona una mayor continuidad de aporte de energía durante el proceso de compresión frente al modelo clásico de un único muelle continuo.
- ❖ El modelo teórico desarrollado en el proyecto ha demostrado ser fiable en gran medida al ser los resultados obtenidos de potencias en las pruebas de campo muy parecidos a los obtenidos de forma teórica.

5. POSIBLES MEJORAS

En futuras líneas de investigación relacionadas con este proyecto, se plantea el estudio más en profundidad del sistema de hop up y el efecto Magnus que interviene en él, a fin de determinar si es viable un rediseño completo a fin de conseguir alguna mejora respecto al sistema actual, ya que esto representa un papel importante en el vuelo del proyectil.

También que pendiente un estudio de implementación de los conceptos y avances logrados en este proyecto en productos actuales y realizar un estudio económico y de mercado para determinar su viabilidad.

Bibliografía

1. **Conesa, Luis Miralles.** Compleja historia de la formulación de la Ley de Boyle. *Didáctica de las ciencias experimentales y sociales*. s.l. : Redined, 2003, págs. 37-53.
2. **Gramyó, Josep M. Bergadá.** *Mecánica de fluidos: breve introducción teórica con problemas resueltos*. Terrassa : Univesidad Politécnica de catalunya, 3ª edición.
3. **J.A. Rayas, R. Rodríguez-Vera y A. Martínez.** Medición del módulo de Young en el hule látex usando ESPI. *Revista mexicana de física*. 49, 2003, Vol. 6, 555-564.
4. **Pezzotti, Santiago.** Estudio experimental del efecto magnus en cuerpos cilíndricos de secciones transversales diversas. *Tesis de Doctorado*. La Plata : s.n., 2016.
5. *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO TREN DE LAMINACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LÁMINAS DE LÁTEX.* **Jorge Luis Enciso, Jorge Freddy Llano ,Néstor Graciano, Camilo Olaya.** 86-92, Medellín : revista colombiana de materiales, Vol. 5.
6. **Mott, Robert.** *Mecánica de fluidos*. s.l. : PEARSON.
7. **Nimrod tactical.** [En línea] <https://nimrodtactical.com/batteries/>.
8. **Gate Enterprise.** [En línea] <https://gatee.eu/products/titan/titan-v2>.
9. **SHS airsoft.** [En línea] <https://www.shs-airsoft.com/product/shs-121-gear-set/>.