

# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

# ESTUDIO Y MODELADO DE LA UNIDAD DE POTENCIA DE UN RIFLE DE PCP

Autor: José Eduardo Lozano Sánchez

Director: Juan de Norverto Moriñigo

Madrid Mayo 2015



#### AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN ACCESO ABIERTO (RESTRINGIDO) DE DOCUMENTACIÓN

#### 1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor D. José Eduardo Lozano Sánchez, como alumno de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS (COMILLAS), **DECLARA** que es el titular de los derechos de propiedad intelectual, objeto de la presente cesión, en relación con la obra Proyecto Fin de Carrera<sup>1</sup>, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual como titular único o cotitular de la obra.

En caso de ser cotitular, el autor (firmante) declara asimismo que cuenta con el consentimiento de los restantes titulares para hacer la presente cesión. En caso de previa cesión a terceros de derechos de explotación de la obra, el autor declara que tiene la oportuna autorización de dichos titulares de derechos a los fines de esta cesión o bien que retiene la facultad de ceder estos derechos en la forma prevista en la presente cesión y así lo acredita.

#### 2º. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad y hacer posible su utilización de *forma libre y gratuita* (*con las limitaciones que más adelante se detallan*) por todos los usuarios del repositorio y del portal e-ciencia, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución, de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra (a) del apartado siguiente.

#### 3º. Condiciones de la cesión.

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia, el repositorio institucional podrá:

(a) Transformarla para adaptarla a cualquier tecnología susceptible de incorporarla a internet; realizar adaptaciones para hacer posible la utilización de la obra en formatos electrónicos, así

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Especificar si es una tesis doctoral, proyecto fin de carrera, proyecto fin de Máster o cualquier otro trabajo que deba ser objeto de evaluación académica



como incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar "marcas de agua" o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.

(b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo abierto institucional, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.<sup>2</sup>

(d) Distribuir copias electrónicas de la obra a los usuarios en un soporte digital.<sup>3</sup>

#### 4º. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra que cede con carácter no exclusivo a la Universidad por medio de su registro en el Repositorio Institucional tiene derecho a:

a) A que la Universidad identifique claramente su nombre como el autor o propietario de los derechos del documento.

b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.

c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada. A tal fin deberá ponerse en contacto con el vicerrector/a de investigación (curiarte@rec.upcomillas.es).

d) Autorizar expresamente a COMILLAS para, en su caso, realizar los trámites necesarios para la obtención del ISBN.

d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

(c) Comunicarla y ponerla a disposición del público a través de un archivo institucional, accesible de modo restringido, en los términos previstos en el Reglamento del Repositorio Institucional

<sup>3</sup> En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría eliminado.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> En el supuesto de que el autor opte por el acceso restringido, este apartado quedaría redactado en los siguientes términos:



#### 5º. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.

b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.

c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

#### 6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

a) Deberes del repositorio Institucional:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.

- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.

- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.

b) Derechos que se reserva el Repositorio institucional respecto de las obras en él registradas:

- retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.



Madrid, a 28 de mayo de 2015



Fdo.....

Proyecto realizado por el alumno/a: José Eduardo Lozano Sánchez Fecha: 28 / 05 / 2015 Fdo.: Autorizada la entrega del proyecto cuya información no es de carácter confidencial EL DIRECTOR DEL PROYECTO Juan de Norverto Moriñigo Fecha: 28.1. V. 1. 2.915 Fdo.: .... Vº Bº del Coordinador de Proyectos José Ignacio Linares Hurtado Fecha: ...../ ...../ ...../ Fdo.: .....

## ESTUDIO Y MODELADO DE LA UNIDAD DE POTENCIA DE UN RIFLE DE PCP

#### Autor: Lozano Sánchez, José Eduardo.

Director: Norverto Moriñigo, Juan de.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia de Comillas.

### **RESUMEN DEL PROYECTO**

#### Introducción

El proyecto consiste en el estudio y modelado de la unidad de potencia de un rifle de aire pre-comprimido (PCP) centrándonos tanto en el mecanismo del mismo, así como en el comportamiento del aire en su utilización como fluido de trabajo. El modelo a estudiar es el Airforce Condor por ser uno de los más completos del mercado en cuanto a prestaciones y calidad. A través del modelado analítico y numérico de las diferentes etapas del rifle, se identificarán los parámetros que intervienen en el funcionamiento del mismo, y como dichos parámetros pueden ser optimizados para lograr un mayor rendimiento en las armas de PCP.

#### Metodología y Resultados

Este proyecto se halla dividido en cuatro partes principales, tres de las cuales se corresponden con las etapas de disparo de un rifle de PCP: estudio del depósito de aire comprimido como fuente de energía del arma, análisis del cañón como medio de transmisión de la energía entre el gas y el proyectil, estudio de las trayectorias balísticas en función de los parámetros del arma y el proyectil, y determinación de una herramienta analítica para el cálculo de las distancias mínimas de seguridad.

El mecanismo de funcionamiento de las armas de aire pre-comprimido, se basa en la liberación de una cierta cantidad de aire en la recámara de las mismas en la cual ha sido situado un proyectil. Típicamente, la unidad de potencia es un depósito de aire comprimido pre-cargado antes de ser colocado en el arma, o un depósito fijo montado en la misma.



Figura 1. Diagrama de las principales partes del Airforce Condor

El objetivo del análisis de la descarga del depósito de un arma de PCP es determinar el tipo de expansión que mejor se ajuste al comportamiento real del rifle durante el disparo, con el fin de construir un modelo que nos permita la predecir la velocidad de salida del proyectil.

A la hora de estudiar la descarga de un depósito de gas comprimido, se pueden llevar a cabo dos suposiciones en lo referente a su proceso de expansión termodinámica: expansión adiabática o expansión isotérmica. Esta última, es apropiada para procesos de descarga lentos, donde hay suficiente tiempo para la transmisión de calor y el mantenimiento constante de la temperatura del gas en el depósito [DUTT97]. Este es nuestro caso de interés debido al funcionamiento del rifle, donde se liberan pequeñas cantidades de aire comprimido en cada disparo con un intervalo temporal considerable entre los mismos.

Asumiendo que nuestra presión interior del depósito va a ser siempre muy superior a la presión atmosférica a la salida de la válvula (mayor del 52.8%) [OKEE03], consideraremos que el flujo de aire a través de la misma se hallará siempre estrangulado durante el proceso de disparo. De este modo, se deduce la solución isotérmica para flujo crítico o estrangulado de la presión en función del tiempo:

$$\frac{P_{salida}}{P_{interior}} = exp\left[-\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{-\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \cdot \frac{A \cdot c}{V} \cdot t\right]$$
(1)

Dónde  $\gamma \equiv$  Coeficiente de dilatación adiabática del gas;  $A \equiv$  Área del conducto de salida;  $c \equiv$  Velocidad del sonido del gas;  $V \equiv$  Volumen del depósito de gas comprimido;  $t \equiv$  Tiempo. Esta expresión se particulariza para el Airforce Condor:



Figura 2. Modelo analítico de la expansión del depósito de aire comprimido del Airforce Condor.

Por otro lado, con el fin de validar esta solución analítica, se construye un modelo numérico en Ansys Autodyn que simula la unidad de potencia del Airforce Condor.



Figura 3. Ejecución del modelo numérico del depósito de aire comprimido del Airforce Condor en Autodyn. Ciclo 460

Procedemos al cálculo del error de aproximación porcentual entre el modelo analítico y el numérico, con el fin de validar la precisión de la expansión isotérmica como modelo predictivo de la presión en las armas de PCP. Cogemos cinco instantes de tiempo al principio de la expansión debido a que el tiempo de apertura de la válvula durante el disparo es muy breve. Dichos valores queda recogidos en la siguiente tabla:

	Expan. Isotérmica	Autodyn	Error %
t = 10 ms	181.06 bar	180.25 bar	0.44%
t = 20 ms	159.14 bar	160.00 bar	0.54 %
t = 30 ms	139.88 bar	138.07 bar	1.29 %
t = 40 ms	122.94 bar	120.94 bar	1.62 %

Tabla 1. Estimación del error de aproximación para ambos modelos.

A continuación, partiendo de dicha expansión isotérmica del depósito de aire comprimido [DENN11], procedemos a la determinación de un modelo analítico para la predicción de la velocidad de salida del proyectil en función una serie de parámetros del rifle y el proyectil:

$$V_{salida} = \sqrt{\frac{2}{m} \left[ P_o V_o Ln \left( 1 + \frac{AL}{V_o} \right) - fL \right]}$$
(2)

Donde,  $V_{salida} \equiv$  Velocidad de salida del proyectil (m/s);  $m \equiv$  Masa del proyectil (kg);  $P_o \equiv$  Presión inicial del gas (Pa);  $V_o \equiv$  Volumen inicial del gas (m3);  $A \equiv$  Área transversal del cañón (m2);  $L \equiv$  Longitud del cañón (m);  $f \equiv$  Fuerza de rozamiento proyectil-cañón (N).

Se procede, a continuación, a la validación de la precisión de esta fórmula como modelo de predicción analítica de la velocidad en función de la presión interna del depósito. Para ello, sustituimos los parámetros del Airforce Condor del calibre 6.35 mm y empleando un proyectil H&N Baracuda de 2.01gr. Dichos valores son comparados con

las lecturas experimentales de velocidad durante un test de descarga del rifle para el mismo proyectil. Partiendo de una presión máxima de 206 bares, se efectúan 34 disparos consecutivos midiendo la velocidad del proyectil a la salida del cañón.



Figura 4. Valores de velocidad del proyectil durante el test de descarga y ecuación analítica estimada

Usando la ecuación deducida anteriormente, podemos llevar a cabo predicciones analíticas de la velocidad de salida del proyectil y de los correspondientes valores de presión en el depósito, asumiendo un error aproximado del 4.56%.

A continuación, se procede al estudio de la balística exterior, entendida como el estudio de las trayectorias y los efectos perturbadores del medio ambiente sobre el proyectil. Para ello, definimos el coeficiente balístico de un cuerpo como una medida de la habilidad de dicho cuerpo para superar la resistencia del aire durante su vuelo [HOUS03]. De este modo, un coeficiente balístico alto implica una mayor eficiencia aerodinámica del proyectil. Se lleva a cabo el análisis de la caída de la energía cinética, en un rango de 100 metros, y para tres proyectiles con distintas masas y coeficientes balísticos: el H&N Baracuda, el JSB Exact King, y el Beeman FTS.

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
BC	0.042	0.036	0.012
E <sub>c inicial</sub>	99.25 J	92.74 J	79.58 J
$E_{c100m}$	47.63 J	37.62 J	6.10 J
$\Delta E_c \%$	52.01 %	59.43 %	92.33 %

Tabla 2. Energía cinética disipada durante el vuelo cada proyectil

Tal y como refleja la tabla anterior, la pérdida de energía del proyectil durante su vuelo es altamente dependiente de su coeficiente balístico.

Por último, se procede a la implantación de una herramienta sencilla de cálculo para la determinación de las distancias mínimas de seguridad contra dos tipos de impactos accidentales: impacto directo e impacto ricochet.

Esta herramienta es aplicada al Airforce Condor del calibre 6.35 mm usando los tres proyectiles referidos anteriormente. El primer paso, consiste en determinar las velocidades límite de impacto que no producen riesgo alguno de lesiones en las personas de acuerdo con la referencia [DEEN81]. A continuación, determinamos la caída de velocidad de cada proyectil [DESA94] y establecemos la distancia mínima de seguridad contra impacto directo. Por otro lado, para evaluar el riesgo por ricochet, debemos primero determinar el ángulo crítico (en función del proyectil y la superficie de impacto) [CARL07] y, a continuación, la velocidad de rebote [DESA94]. La siguiente tabla muestra las distancias de seguridad estimadas para el Airforce Condor, los tres proyectiles anteriores, y suponiendo una diana de acero como superficie reflectante son:

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
Calibre	6.35 mm	6.35 mm	6.35 mm
Masa	2.01 g	1.65 g	1.30 g
Velocidad Límite de Impacto	64.48 m/s	70.10 m/s	76.20 m/s
Impacto directo	497.5 m	408.2 m	119.1 m
Impacto ricochet	5.20 m	<b>4.05</b> m	2.38 m

Tabla 3. Distancias mínimas de seguridad contra impacto directo e impato ricochet

#### Conclusiones

A través del modelado analítico y numérico de las diferentes etapas del rifle, se ha logrado identificar los parámetros que intervienen en el funcionamiento del mismo, y como dichos parámetros pueden ser optimizados para lograr un mayor rendimiento en las armas de PCP. Los modelos analítico y numérico realizados, muestran una excelente concordancia en sus predicciones de la despresurización de la unidad de potencia del arma con errores inferiores al 2 %, lo que implica, que la hipótesis de solución isotérmica para flujo crítico se ajusta con gran precisión al comportamiento real del presente diseño.

Por otro lado, la implementación de un modelo analítico para predicción de la velocidad de salida del proyectil, ha revelado que el cañón es el principal intermediario en la transmisión de energía gas-proyectil, y que su longitud y fricción interna son parámetros que deben ser optimizados con el fin de obtener el máximo rendimiento posible del rifle. A continuación, el estudio de la balística interna ha mostrado la importancia del coeficiente balístico como parámetro determinante en la conservación de la energía del proyectil durante el vuelo.

Finalmente, se ha llevado a cabo la implementación de una herramienta de cálculo para la predicción de las distancias de seguridad considerando dos tipos de impacto accidental: directo y ricochet. La determinación de estas distancias para el caso del Airforce Condor, ha revelado que las armas de PCP no deben ser nunca subestimadas como un juguete inofensivo puesto que su peligrosidad es evidente.

#### Referencias

- [DENN11] Denny, M., "The Internal Ballistic of an Airgun", Victoria, British Columbia, Canada V9C 3Z2, DOI: 10.1119/1.3543577, THE PHYSICS TEACHER. Vol. 49, February 2011.
- [OKEE03] O'Keefe Controls CO, "Tutorial of Choked Flow", Trumbull, CT 06611, 2003.
- [DESA94] ME, "Design Safety Standards Manual", Chapter 4, 1-Personnel and Equipment Shields, Revision, September 1994.
- [DUTT97] Dutton, J.C., Coverdill, R.E., "Experiments to Study the Gaseous Discharge and Filling of Vessels", Int. J. Engng Ed. Vol. 13, No. 2, p. 123-134, 1997.
- [DEEN81] U.S. Department of Energy, "Manual for the prediction of blast and fragment loadings in structures" DOE/TIC-11268, November 1981.
- [CARL07] Carlucci, R.E., Jacobson, S.S., "Ballistics: theory and design of guns and ammunition", ISBN: 978-1-4200-6618-0, 2007.

### STUDY AND MODELING THE POWER UNIT OF A PCP RIFLE

#### Introduction

This project involves the study and modeling the power unit of a Pre-Charged Pneumatic rifle (PCP), focusing on the body of the gun as well as the behavior of air and its use as a working fluid. The Airforce Condor PCP rifle will be analyzed because of its performance and quality as compressed air weapon. The parameters of the rifle involved during the firing stage will be indentified and optimized in order to obtain better performance. Analytical and numerical methods will constitute the base of this analysis.

#### **Methodology and Results**

This paper is divided into four main parts, three of them correspond to the firing stages of a PCP rifle: the study of the compressed air as energy source, analysis of the barrel as energy transmission body between gas and projectile, ballistics trajectories depending on the parameters of the gun and the projectile, and development of an analytical guideline for the estimation of safety distances.

Pre-Charged Pneumatic weapons are based on the release of a certain amount of compressed air within the gun chamber where a projectile has been placed. Typically, this energy source is a pre-loaded gas reservoir which is filled before be screwed in the gun, or a compressed air tank attached permanently to the gun.



Figure 1. Airforce Condor main parts

The goal of the tank discharge analysis is to determine the type of expansion that best represent the actual behavior of the rifle during shooting. The goal is to build a model that allows us to predict the projectile muzzle velocity.

Two different assumptions of the gas expansion can be made for this discharge process: adiabatic expansion or isothermal expansion. The isothermal expansion represents a good model for slow discharge processes where there is enough time for heat transfer and the maintenance of a constant gas temperature within the tank [DUTT97]. This is our particular case of interest due to the way of how the rifle works. A small quantity of compressed air is released for each shot assuming enough time between each of them.

Because of the tank internal pressure will be always much higher than the atmospheric pressure at the valve outlet (greater than 52.8%) [OKEE03], we assume choked flow through the valve port. Thus, the isothermal solution for choked flow is as follows:

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = exp\left[-\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{-\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \cdot \frac{A \cdot c}{V} \cdot t\right]$$
(1)

Where,  $\gamma \equiv$  heat capacity ratio of air; A  $\equiv$  cross sectional area of the conduit; c  $\equiv$  speed of sound of air; V  $\equiv$  gas tank volume; t  $\equiv$  time. This expression is particularized for the Airforce Condor:



Figure 2. Analytical model of the gas expansion for the Airforce Condor

Additionally, a numerical model using Ansys Autodyn was built in order to validate this analytical solution.



Figure 3. Numerical model execution for the Airforce Condor gas tank. Cycle 460

Next, the approximation error between the analytical and numerical solutions is determined in order to validate the accuracy of the isothermal expansion as prediction model for PCP weapons. Five different time instants are considered for this validation and pressure values are shown in the following table:

	Isothermal Exp.	Autodyn	Error %
t = 10 ms	181.06 bar	180.25 bar	0.44%
t = 20 ms	159.14 bar	160.00 bar	0.54 %
t = 30 ms	139.88 bar	138.07 bar	1.29 %
t = 40 ms	122.94 bar	120.94 bar	1.62 %

Table 1. Approximation error between analytical and numerical solutions.

Assuming isothermal expansion for the compressed air [DENN11], we proceed to determine an analytical model for the prediction of the projectile muzzle velocity based on projectile and rifle parameters:

$$V_{muzzle} = \sqrt{\frac{2}{m} \left[ P_o V_o Ln \left( 1 + \frac{AL}{V_o} \right) - fL \right]}$$
(2)

Where,  $V_{muzzle} \equiv$  projectile muzzle velocity (m/s);  $m \equiv$  projectile mass (kg);  $P_o \equiv$  gas initial pressure (Pa);  $V_o \equiv$  gas initial volume (m3);  $A \equiv$  cross sectional area of the barrel (m2);  $L \equiv$  barrel length (m);  $f \equiv$  friction force between projectile and barrel (N).

Next, one must validate the accuracy of this solution as analytical model for the prediction of the muzzle velocity as a function of the gas tank pressure. Airforce Condor parameters for 6.35 mm caliber and a 2.01grams H & N Baracuda projectile are evaluated. These values are also compared with experimental velocity values measured during the rifle discharge test. Assuming a maximum pressure of 206 bars, 34 sequential shots were made, and the muzzle velocity was recorded for each of them.



Figure 4. Experimental muzzle velocities vs. analytical model

Using the analytical equation presented before, one can predict the projectile muzzle velocity for specific gas pressure value assuming an approximate error of 4.56%.

The next step will be the study of the external ballistics for better understand the effects of the environment on the projectile and the prediction of its trajectory. First, we define the ballistic coefficient of a body as the ability of the body to overcome the air drag force during its flight [HOUS03]. Thus, a high ballistic coefficient means greater aerodynamic efficiency of the projectile. The analysis of the kinetic energy drop is developed within a 100 meters range for three different projectiles: H & N Baracuda, the JSB Exact King, and Beeman FTS.

Brand	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
BC	0.042	0.036	0.012
$E_{c0m}$	99.25 J	92.74 J	79.58 J
$E_{c100m}$	47.63 J	37.62 J	6.10 J
$\Delta E_c \%$	52.01 %	59.43 %	92.33 %

Table 2. Kinetic energy dissipated during the projectile flight

As it was shown in the table above, the energy loss of the projectile during its flight is highly dependent on its ballistic coefficient.

Finally, the implementation of a simple calculation guideline for the determination of the range of safe distances is performed. Two types of accidental impacts are considered: direct impact and ricochet impact.

This analytical tool is applied to a 6.35mm Airforce Condor caliber using the three projectiles mentioned above. The first step is to determine the impact velocity limits that do not represent any risk of injury against humans. This prediction is performed according to the reference [DEEN81]. Then, one must calculate the velocity attenuation for each projectile [DESA94] for the determination of the minimum safety distance for direct impact. On the other hand, in order to evaluate the risk of ricochet, one must first determine the critical angle (depending on the projectile and impact surface) [CARL07] and the ricochet velocity [DESA94]. Safety distances are estimated for the Airforce Condor and the three previous projectiles assuming a steel target as reflective surface:

Brand	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
Caliber	6.35 mm	6.35 mm	6.35 mm
Mass	2.01 g	1.65 g	1.30 g
Limit Impact Velocity	64.48 m/s	70.10 m/s	76.20 m/s
Direct Impact	497.5 m	408.2 m	119.1 m
Ricochet Impact	5.20 m	4.05 m	2.38 m

Table 3. minimum safety distances from direct impact and ricochet impato

#### Conclusions

Analytical and numerical modeling of the different stages of the rifle allows us to identify the parameters involved in the firing process. Then, these parameters can be optimized for better performance of PCP guns.

The analytical and numerical models show excellent agreement in their predictions for the discharge process of the gas reservoir with less than a 2% error. This low error value implies that the hypothesis of isothermal solution for choked flow represent accurately the actual performance of this design.

Additionally, the implementation of an analytical model for the prediction of the muzzle velocity has revealed that the barrel is the main responsible in energy transmission process between gas and projectile. Thus, its length and internal friction are parameters that must be optimized in order to obtain the maximum gun performance.

Next, the internal ballistics has shown the importance of the ballistic coefficient as a determining parameter in the conservation of energy during the projectile flight.

Finally, a guideline for the prediction of safety distances has been implemented considering two types of accidental impacts: direct and ricochet. The calculation of these distances for the Airforce Condor, have revealed that PCP weapons should never be underestimated as a harmless toy because their irresponsible use implies serious hazards for people.

#### References

[DENN11]	Denny, M., "The Internal Ballistic of an Airgun", Victoria, British	
	Columbia, Canada V9C 3Z2, DOI: 10.1119/1.3543577, THE PHYSICS	
	TEACHER. Vol. 49, February 2011.	
[OKEE03]	O'Keefe Controls CO, "Tutorial of Choked Flow", Trumbull, CT 06611	
	2003.	
[DESA94]	ME, "Design Safety Standards Manual", Chapter 4, 1-Personnel and	
	Equipment Shields, Revision, September 1994.	
[DUTT97]	Dutton, J.C., Coverdill, R.E., "Experiments to Study the Gaseous	
	Discharge and Filling of Vessels", Int. J. Engng Ed. Vol. 13, No. 2, p.	
	123-134, 1997.	
[DEEN81]	U.S. Department of Energy, " Manual for the prediction of blast and	
	fragment loadings in structures" DOE/TIC-11268, November 1981.	
[CARL07]	Carlucci, R.E., Jacobson, S.S., "Ballistics: theory and design of guns and	
	ammunition". ISBN: 978-1-4200-6618-0, 2007.	



# ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

# ESTUDIO Y MODELADO DE LA UNIDAD DE POTENCIA DE UN RIFLE DE PCP

Autor: José Eduardo Lozano Sánchez

Director: Juan de Norverto Moriñigo

Madrid Mayo 2015

# Índice

1. Introducción
2. Armas de aire comprimido
2.1. Historia de las armas de aire comprimido7
2.2. Uso de las armas de aire comprimido en la actualidad7
2.3. Desarrollo de las armas de aire comprimido en el mundo10
2.3.1. Desarrollo de las armas de aire comprimido en Europa11
2.3.1. Desarrollo de las armas de aire comprimido en Estados Unidos13
2.3.1. Desarrollo de las armas de aire comprimido en Corea15
2.3.1. Desarrollo de las armas de aire comprimido en Turquía16
2.4. Tipos de armas de aire comprimido17
2.4.1. Rifles de pistón17
2.4.2. Rifles de aire pre-comprimido (PCP)20
2.4.3. Comparativa: Rifles de pistón vs. Rifles de PCP25
3. Airforce Condor
3.1. Especificaciones técnicas
3.1.1. Ajuste de potencia
3.1.2. Secuencia de disparo
3.2. Funcionamiento mecánico
3.2.1. Descripción detallada de las partes
3.3.3. Listado de piezas
4. Despresurización de depósitos de gas comprimido
4.1. Fundamentos físicos
4.1.1. Presión
4.1.2. Leyes de los gases40
4.1.3. Termodinámica del volumen de control41
4.2. Modelo analítico de la descarga del depósito de aire comprimido43
4.2.1. Flujo crítico o estrangulado44
4.2.2. Resultados del modelo analítico de la descarga del depósito46

4.3. Modelo numérico de la descarga del depósito de aire comprimido47
4.3.1. Construcción del depósito de aire comprimido47
4.3.2. Simulación de la descarga del depósito de aire comprimido49
4.3.3. Resultados del modelo numérico de la descarga del depósito52
4.3.4. Comparación entre los modelos analítico y numérico
5. Balística
5.1. Balística interna
5.1.1. Modelo analítico del comportamiento del proyectil en el interior del cañón
5.1.2. Ensayos experimentales
5.1.3. Validación de los resultados analíticos
5.1.4. Rendimiento del rifle de aire pre-comprimido
5.2. Balística externa
5.2.1. Proyectiles
5.2.2. Análisis de la trayectoria del proyectil73
5.2.3. Determinación de la variación de velocidad del proyectil78
5.3. Balística terminal
5.3.1. Análisis de la penetración del proyectil
6. Determinación de las distancias de seguridad para el uso de rifles de PCP91
6.1. Distancia mínima de seguridad para impacto directo
6.2. Distancia mínima de seguridad para impacto ricochet
7. Conclusiones
8. Desarrollos futuros
9. Bibliografía
Anexo I: Planos Airforce Condor107
Anexo II: Resultados tabulados Hawke ChairGun Pro para cada proyectil111
Anexo III: Desarrollo cálculos analíticos en Derive115
Anexo IV: Tablas balísticas123

- 4 -

## 1. Introducción

El proyecto consiste en el estudio y modelado de la unidad de potencia de un rifle de aire pre-comprimido (PCP) centrándonos tanto en el mecanismo del mismo, así como en el comportamiento del aire como fluido de trabajo. El modelo a estudiar es el Airforce Condor por ser uno de los más completos del mercado en cuanto a prestaciones y calidad.

Las principales ventajas que han hecho que muchos tiradores prefieran las armas de aire pre-comprimido a las armas de fuego son, básicamente, la precisión que poseen y la sencillez de su manejo.

El principal uso de este tipo de armas es el tiro deportivo, sin embargo, en algunos países su uso también está permitido para la caza. Una de las principales actividades de tiro deportivo es el Field Target o Tiro de Campo.

Las siglas PCP derivan de los términos ingleses Pre Charged Pneumatic, es decir, aire pre-comprimido. Los rifles y pistolas de PCP cuentan con un depósito de almacenamiento del aire, el cuál pasa a una válvula a través de un mecanismo de carga. Con el accionamiento del gatillo se abre la válvula y el aire queda liberado con toda su presión ofreciendo impulso a la munición del arma que sale disparada a grandes velocidades. La presión del aire en el depósito disminuye sucesivamente con cada disparo dependiendo del modelo del arma. No obstante, las variaciones no son muy acusadas ofreciendo disparos muy similares.

Para el llenado del depósito de las armas de PCP, existen diversos sistemas de recarga. En la actualidad se continúa innovando en este sentido intentando facilitar el llenado del depósito incorporando sistemas de bombeo múltiple, sin embargo, el sistema más común es el uso de bombas manuales que, aunque requieren de un importante esfuerzo físico, tienen un coste inferior al que podrían tener otros sistemas de recarga. También pueden emplearse bombas eléctricas como comprensores que realizan la recarga de la carabina de manera precisa y rápida, sin embargo, el costo es muy elevado.

Otro sistema empleado es el uso de tanques de alta presión (300 bares) externos. Los más comunes son los usados en actividades de buceo con equipo autónomo, es decir el Self Contained Underwater Breathing Aparatus, más popularmente conocido como SCUBA. Estos tanques proporcionan el aire a la presión necesaria a través de una serie de adaptadores. La desventaja de estos tanques es que pueden resultar caros y a veces difíciles de conseguir.

Tras llevar a cabo una revisión a la historia de las armas de aire comprimido, se procederá a estudiar los distintos tipos. Las principales competidoras de las armas de PCP son las armas de pistón, por ello se realizará un análisis exhaustivo de ambos tipos determinando como sus principales ventajas e inconvenientes.

A continuación, se procederá a estudiar los componentes mecánicos del Airforce Condor, con el fin de obtener una profunda comprensión del funcionamiento del mismo mediante el análisis de todas y cada una de sus piezas individuales.

Lo siguiente será proceder al análisis termodinámico del aire comprimido como fluido de trabajo. Para ello, se presentarán los diversos tipos de expansiones (adiabática e isotérmica) determinando la que mejor se ajuste al modelado del depósito de aire. Además, se implementará un modelo numérico que simulará la expansión del depósito

de aire través de la herramienta Ansys Autodyn, la cual nos brinda la posibilidad de estudiar el comportamiento no lineal de fluidos y gases.

Un procedimiento similar se llevara a cabo con el estudio balístico, realizando primeramente una serie de cálculos analíticos en los cuales se aplicaran conocimientos de mecánica de fluidos y termodinámica, seguidos de una validación de las ecuaciones mediante una serie de pruebas experimentales.

Por último, el proyecto se centrara en la evaluación de riesgos en el uso de las armas de aire pre-comprimido estableciendo un modelo analítico para la determinación de las distancias mínimas de seguridad. Este último apartado estudiará dos tipos de impacto accidental: el impacto directo y el impacto ricochet. El objetivo será proporcionar a los usuarios de las armas de PCP, tanto principiantes como profesionales, una herramienta sencilla de cálculo que les permita el uso de sus armas de aire comprimido con la máxima seguridad posible.

## 2. Armas de aire comprimido

Las armas de aire comprimido son aquellas que utilizan la fuerza del aire comprimido para impulsar un proyectil, en contraposición a las armas de fuego, que se basan en la deflagración de la pólvora para obtener el mismo fin [WIKI09].

#### 2.1. Historia de las armas de aire comprimido

El primer uso documentado del aire comprimido para propulsar un proyectil aparece a finales del 1500, cuando un armero llamado Hans Lobsigner fabricó el primer rifle de mano de aire. En la década del 1600, varios países europeos producían y suministraban armas de aire para protección personal. El ejemplo más antiguo conocido es el rifle de aire que se conserva en el Arsenal Real de Dinamarca en Copenhague y data de alrededor del 1580.

A finales de los siglos XVI y XVII, la tecnología y el uso del rifle de aire empieza a ganar popularidad dentro del tiro élite. Estas armas igualaron el poder y la precisión de las armas de caza convencional y las armas de fuego militares de la época. Los primeros exploradores estadounidenses Lewis y Clark, por ejemplo, llevaron un rifle de aire durante su expedición entre los años 1804 - 1806. El rifle neumático de gran calibre que portaban era capaz disparar más de treinta proyectiles con una sola carga abatiendo incluso ciervos a considerable distancias.

Los rifles de aire también fueron empleados como armas de guerra en Europa durante la década del 1700. Las armas diseñadas y utilizadas para este propósito presentaban una potencia más que respetable, capaces de disparar un calibre .50 con un radio letal de 50 metros. Este hecho, unido a la repetibilidad que presentaban, hizo que armas de aire fueran superiores a los mosquetones en dichos aspectos.

Por otro lado, la reducción en ruido y humo a la salida del cañón, hizo que estas armas se convirtieran en las ideales para los "francotiradores" de la época debido a la dificultad de localizar la posición del tirador tras el disparo. Otro uso documentado es el que llevaron a cabo los cazadores furtivos debido a las ventajas descritas anteriormente, sin embargo, el elevado coste que presentaban estos rifles de aire comprimido, los hacia prácticamente exclusivos de las clases altas de la sociedad.

La primera producción a gran escala de un rifle de aire fue el diseño de cámara de fuelles. Como su propio el nombre indica, estas armas empleaban fuelles cargados a través de un muelle para generar la energía que sería transmitida al proyectil. Un mecanismo de trinquete alojado en la culata del rifle era empleado para comprimir el muelle. Estas armas de retrocarga disparaban proyectiles de hasta calibre .50, pero debido a su baja potencia fueron solo utilizadas para tiro a corta distancia.

Otro diseño, observado por primera vez alrededor de 1600, fueron los rifles de pistón con algunas variaciones en los tipos de muelle empleados dentro de la cámara. Durante la primera mitad del siglo XIX, el rifle de pistón se estableció en Europa para tiro al blanco es espacios cerrados. A mediados de la década de 1800, este rifle de aire había encontrado su camino al Nuevo Mundo en las galerías de tiro haciéndose muy popular

como deporte de competición. Las armas neumáticas han sido desarrolladas desde principios del 1600 al tiempo que las tecnologías aplicadas han sido cada vez más variadas y complejas. El calibre de estas armas ha variado del .30 al .68 así como las presiones del aire comprimido desde 5 bares hasta 200 bares.

Cuando aparecieron los primeros rifles neumáticos, estos se convirtieron en una excelente herramienta en la búsqueda de la precisión con un gran calibre. Sin embargo, a pesar de su efectividad, no eran realmente frecuentes debido a su elevado coste de producción y mantenimiento comparado con las armas de fuego de la época. Las habilidades, conocimientos y gran cantidad de tiempo necesario para hacer las complejas válvulas, cerraduras y depósitos de aire de las primeras armas de aire, suponía que sólo los tiradores de las clases más altas de la sociedad podían permitírselas.

Hubo una serie de fabricantes en Europa y Norte América, que tuvieron éxito con varios diseños de armas de aire para diferentes aplicaciones; por ejemplo, un arma austríaca de calibres entre el .40 y el .52 que podía efectuar de 15 a 20 disparos por minuto [CHAP09]. De este modo, un grupo de soldados armados con este tipo de rifles de aire podría disparar varios miles de disparos con una cadencia de fuego considerable, lo que significa que presentarían varias veces la potencia de fuego de las tropas armadas con fusiles de chispa.

Por otro lado, las armas de aire comprimido más poderosas del pasado se basaban en un mecanismo de bombeo neumático, el cual implica el bombeo de aire desde un depósito hacia el arma pasando a través de una válvula. Las bombas se construían en ocasiones en el cuerpo del propio rifle, pero era más a común que estas estuvieran separadas del mismo, lo que permitía que el tirador pudiera llevar varios depósitos y realizar recargas rápidas. La recarga de un depósito podía llevar cientos de carreras de la bomba, pero como se ha señalado anteriormente, el que podía permitirse un arma de aire comprimido normalmente contaba con sirvientes que se encargaban del bombeo manual de los depósitos.

Las viejas armas de aire ofrecían numerosas ventajas a todos aquellos tiradores que podían permitírselas. La primera era la cadencia de fuego, ya que se podían llevar a cabo más disparos por minuto que con las armas clásicas de pólvora de avancarga. Por otro lado, los armas de aire comprimido no eran totalmente insonoras, pero presentaban una evidente mejora en el ruido frente a las armas de fuego de potencia similar que, sumado a su falta de humo y flash de luz, las hacían idóneas a la hora de ocultar la posición del tirador. Otras ventajas incluían la falta de chispas, el menor tiempo de disparo, una potencia más consistente, y un cañón libre de residuos de pólvora. Todos estos factores dieron lugar a un arma de tiro que era más fácil de mantener que las armas de fuego de la época.

En la América del siglo XX, las armas de pistón se habían desarrollado hasta un nivel y sofisticación considerable, ganando popularidad en las galerías de tiro. La neumática, a su vez, había alcanzado un alto nivel en Europa de desarrollo con el advenimiento de los rifles de caza entubados. Sin embargo, la introducción de las armas de fuego de cartuchos y la pólvora sin humo paro en seco el desarrollo de armas de aire comprimido. La evolución de las bombas neumáticas y las armas de CO2 se elevaron a nivel de los jóvenes como armas de baja energía. De este modo, y principalmente en Europa, las armas de aire de pistón se convirtieron en fruto de sofisticación y precisión como armas de caza de pequeño calibre.

En los Estados Unidos, el foco del desarrollo de las armas de aire era para el mercado joven donde casi todos los niños del país habían aprendido a disparar con una Daisy o Crosman BB. Sin embargo, junto con esta popularidad, vino la idea errónea de que las armas de aire eran sólo juguetes inofensivos subestimando su evidente peligrosidad.



Figura 1. Rifle neumático de la década de 1700.

Existe una larga tradición de caza con los conocidos como rifles de aire pre-comprimido (PCP) que se remonta a finales del 1600, cuando los rifles de aire de gran calibre eran empleados por la nobleza europea para la caza de grande animales. En los años posteriores, las armas de aire de pistón comenzaron a estar disponibles a las masas pero, después de la Segunda Guerra Mundial, se produjo un dramático incremento en la disponibilidad de armas de fuego. Sin embargo, el tiro deportivo con armas de aire comprimido continúa su desarrollo especialmente en aquellas partes del mundo la posesión de armas de fuego no es un opción para la población civil.



Figura 2.Ardilla abatida con un PCP Benjamin Marauder del calibre .22.

En la actualidad, esta tradición ha emigrado principalmente a Europa donde países como Alemania, España o Reino Unido se encargan de la producción de grandes armas de aire comprimido. Reino Unido es sin duda el centro del actual "airgunning" del mundo produciendo muchas de las mejores armas de pistón y PCP existentes. A su vez, es uno de los pocos países donde existen empresas exclusivamente dedicadas a proporcionar servicios e instalaciones para el desarrollo del deporte con este tipo de armas.

Por otro lado, en los Estados Unidos, este tipo de armas han sido relativamente desconocidas hasta la fecha. En la actualidad, este mercado se está disparando debido a

la extensión de las armas de aire comprimido para la caza de pequeños animales y el conocido como control de plagas. Otro factor que está contribuyendo a la extensión de este tipo de armas, es el constante incremento de aéreas urbanizadas que hacen cada vez más difícil el uso de las armas de fuego.

#### 2.2. Uso de las armas de aire comprimido en la actualidad

Como se dijo anteriormente, en Europa y en gran parte del mundo, las armas de aire comprimido son la única opción fácilmente accesible para las personas que deseen dedicarse a la caza de pequeños animales o al tiro deportivo sin tener que recurrir a los complejos procesos para la obtención de armas de fuego. Pero ¿por qué iba alguien a querer utilizar un arma de aire comprimido en países como los Estados Unidos cuando podrían obtener una carabina del .22 y conseguir más potencia de fuego a menor costo?

Las armas de aire son relativamente silenciosas y presentan un rango de alcance limitado, lo que las hace ideales para el control de plagas y, en general, la caza de pequeños animales en zonas pobladas. Los modernos rifles de PCP ofrecen una excelente precisión con distancias letales entre los 50 y 150 metros, mientras que los rifles de pistón ofrecen similares características para los 30 a 40 metros. Debido a la variedad de armas de aire comprimido que actualmente se ofertan el mercado, uno siempre debe atenerse a tres factores: precisión, potencia y repetitividad.

#### 2.3. Desarrollo las armas de aire comprimido en el mundo

En la actualidad, las armas de aire comprimido se producen en numerosos países de todo el mundo. Los fabricantes estadounidenses se han centrado tradicionalmente en las armas neumáticas multidisparo de bajo coste y en las armas de CO2. Por otro lado, los fabricantes europeos tienden a centrarse en la gama más alta de caza y en los rifles deportivos, con algunas versiones menos costosas procedentes de los países de Europa del Este. Finalmente, en los últimos años, se han producido algunos interesantes modelos en Corea y Turquía, abarcando desde las versiones baratas de los rifles europeos a algunas armas de diseño único. A continuación, se llevara a cabo un análisis del desarrollo de las armas de aire comprimido en las distintas regiones del mundo.



Figura 3. Principales fabricantes de armas de aire comprimido en el mundo

#### 2.3.1. Desarrollo de las armas de aire comprimido en Europa

En muchos aspectos, Europa es el centro del universo "airgunning". De acuerdo con la opinión de los expertos, las mejores armas de aire producidas vienen de la mano de empresas como las británicas Daystate, Theoben, BSA, Webley, Logun, Falcon y Air Arms, las alemanas Weihrauch, RWS, Diana, y Dynamite Nobel, o las españolas Gamo y Norica. La dificultad en la obtención de armas de fuego en Europa impulsa, en cierta medida, el desarrollo de las armas de aire comprimido como una alternativa viable para aplicaciones de caza y tiro deportivo. Estas armas presentan, como norma general, un fino diseño en términos de funcionamiento mecánico, así como atención al detalle y calidad de acabado.

La extensión del conocido como "Field Target" en Reino Unido como deporte de tiro ha supuesto un claro impulso al desarrollo de las armas de aire comprimido. Aunque siempre ha sido mucho más amplia la selección de armas de pistón, en los últimos años se está produciendo un creciente movimiento hacia las armas de PCP.

Figura 4. Principales rifles europeos de aire pre-comprimido:





Gamo CFX



En España, cualquier rifle de aire que genera más de 24.2 Julios debe tener un certificado de armas de fuego. Por ejemplo, si un tirador en los Estados Unidos compra un arma en internet a un vendedor europeo, deben ser conscientes de que el arma puede estar limitada a un nivel de potencia menor que si el arma fue producida para la exportación a los Estados Unidos. Otra diferencia en las leyes que rigen las armas de aire comprimido en España y Estados Unidos, es que en España muchas de estas armas están equipadas con un silenciador, lo que constituye un delito federal en los Estados Unidos si no se cuenta con un permiso específico [CHAP09].

#### 2.3.2. Desarrollo de las armas de aire comprimido en Estados Unidos

Una de las principales razones por la cual el desarrollo de las armas de aire comprimido en los Estados Unidos es inferior frente al resto del mundo es debido al fácil acceso a las armas de fuego, así como la gran disponibilidad de espacios abiertos para su uso. Este hecho influyó, y continúa influyendo en gran medida en las industrias estadounidenses a la hora de sacar al mercado un arma de aire comprimido.

En los Estados Unidos, las armas de aire comprimido encuentran sus principales compradores entre los adolescentes que desean aprender a disparar antes de pasar a las armas de fuego. Por esta razón, este tipo de armas ha degenerado en un juguete cuasi entrenador para tiradores principiantes. Con algunas excepciones, estas armas eran de pistón de baja potencia o réplicas de armas de fuego populares alimentadas con CO2. Las empresas que dominaban el mercado estadounidense han sido Daisy, Crosman y Marksman dentro del mercado principal, y Sheridan y Benjamin como fabricantes de mayor calidad de armas de PCP. Hace unos años, Sheridan y Benjamin se fusionaron y poco después Crosman adquirió la empresa aunque manteniendo la identidad de la marca.

Crosman ha estado liderando la producción de rifles de pistón y más recientemente ha llevado a cabo la entrada en el mercado de las armas de aire pre-comprimido con el Benjamin Discovery. Utilizando sus canales de distribución previos, han conseguido extender en el mercado este primer modelo generando el interés de los tiradores Americanos así como el de los fabricantes de armas de aire comprimido. El éxito del Benjamin Discovery vino seguido del modelo Marauder, con un alto rendimiento y precio inferior al de los rifles europeos.

Por otro lado, se ha producido un importante aumento en la modificación y personalización de armas de aire, tanto en los modelos de pistón como PCP. Diseñadores de armas como Dennis Quackenbush, de Quackenbush Airguns, están produciendo impresionante modelos utilizando doble fuente de CO2 y PCP para rifles de caza, como el XL o el Light Sporter.

En el 2011, Crosman liberó al mercado su primer rifle de aire de gran calibre, el Benjamin Rogue. Este modelo constituyo la primera arma de aire comprimido de gran calibre en EE.UU con unas singulares características. Con un calibre de .357, este arma es capaz de generar mas de 340 Julios abatiendo cerdos a 200 metros de distancia y siendo mas silencioso que un calibre .22. La novedad es que esta arma utiliza un microprocesador para controlar el disparador electrónico y regular la válvula electrónica. Esto permite al rifle optimizar los parámetros para cada tipo específico de munición. A su vez, el microprocesador se encarga de garantizar una máxima repetitividad controlando la cantidad de aire liberada en cada disparo.



Figura 6. Principales rifles estadounidenses de aire pre-comprimido:

#### 2.3.3. Desarrollo de las armas de aire comprimido en Corea

Corea se ha convertido en un importante productor de bajo costo y buena calidad de poderosos diseños de rifles PCP. Dos son los principales fabricantes de este tipo de armas en Corea: Evanix y Sam Yang, ambos de los cuales son distribuidos por Pyramyd Airguns en los Estados Unidos. Los modelos Sam Yang Recluso del calibre 0.357, el Dragon Claw del calibre .50, y el Carrera 707 de 9mm eran, hasta hace poco, los únicos modelos de gran calibre disponibles en el mercado. Este tipo de rifles ofrecen potencia suficiente para abatir desde ardillas hasta incluso ciervos.

Una de las características diferenciadoras de estos rifles coreanos es el almacenamiento del aire comprimido empleando diversas combinaciones de botellas es sus diseños. Estas armas, sin duda, han demostrado una gran robustez y precisión, pero presentan como inconveniente la dificultad de encontrar repuestos y servicio técnico en el resto de ubicaciones del mundo.

Evanix ha producido varios innovadores diseños en los últimos años. Dos claros ejemplos son los modelos semiautomáticos y automáticos Speed y Conquest. El Nuevo Speed presenta un diseño bullpup ofreciendo grandes prestaciones en una versión compacta. El Conquest cuenta con un depósito de 400 centímetros cúbicos, así como un sistema de acción de válvula electro-mecánico que lo hace único dentro de esta familia de armas.

Figura 7. Principales rifles coreanos de aire pre-comprimido:





Sam Yang Recluse

#### 2.3.4. Desarrollo de las armas de aire comprimido en Turquía

Inicialmente los rifles de aire comprimido procedentes de Turquía no ofrecían unas especiales características o calidad, sin embargo, se produjeron una serie de eventos que dieron un vuelco al mercado de los rifles de aire turcos.

En primer lugar, el respetado fabricante británico de armas de fuego y aire comprimido Webley Scott no pudo hacer frente a sus dificultades financieras debido a las nuevas políticas sobre este tipo de armas en Reino Unido, así que todo el equipo fue vendido a un consorcio con sede en Ankara, Turquía.

Una de los primeros rifles producidos fue el Webley Patriot, que fue uno de los rifles de pistón más potentes jamás fabricado. Este rifle ofrecía un gran rendimiento sin embargo presentaba ciertos problemas relacionados con el control de calidad.

Otro conocido modelo es el Hammerli Falcon del calibre 0.25, un rifle de pistón importado por Umarex USA, fabricado como un producto OEM (Fabricante de Equipo Original) en Turquía. Este arma ha sido extendidamente utilizada para caza menor y control de plagas.



Figura 8. Principales rifles turcos de pistón:

Hatsan Torpedo


Hatsan 95 SAS

Sin embargo, ha sido la turca Hatsan la que se ha hecho un hueco principalmente dentro del mercado de los rifles de aire pre-comprimido, ofreciendo precisión, potencia y fiabilidad. En este mercado, existen diferentes modelos disponibles, desde los monotiro a otros semi automáticos con un cargador de tambor rotatorio con capacidad para diez proyectiles. Sin embargo, el principal inconveniente que presentan estos rifles es su elevado peso y un elevado ruido en el disparo.

Figura 9. Principales rifles turcos de aire pre-comprimido:



Hatsan AT44W-10

## 2.4. Tipos de armas de aire comprimido

Las armas de aire comprimido son una tecnología en auge y han tenido gran difusión en los últimos años. Su precisión y su sencillez, hacen de ellas unas armas ideales para el tiro deportivo en diferentes modalidades.

Tal y como se ha mostrado en la sección anterior, este tipo de armas cuentan con una gran variedad de modelos en el mercado. Podría realizarse una clasificación de los rifles según los fabricantes, según el calibre o según su potencia. No obstante, en esta ocasión vamos a hacer una clasificación de la armas de aire comprimido de acuerdo al sistema de carga que posean. Así, dependiendo del mecanismo de acción del rifle, pueden clasificarse en dos tipos: rifles de muelle o pistón y rifles de PCP (Pre Charged Pneumatic) o de aire pre-comprimido.

### 2.4.1. Rifles de pistón

Los rifles de pistón generan la energía necesaria para disparar el proyectil mediante un pistón propulsado por un muelle bajo compresión. El amartillado del rifle se lleva a cabo accionando una palanca que provoca el movimiento del pistón en el interior del cilindro al tiempo que se comprime el muelle de acción. El accionamiento del disparador libera la energía del muelle provocando el movimiento del pistón en el interior del cilindro e impulsando el pequeño volumen de aire que alojaba en su interior contra el proyectil.

Este tipo de rifles pueden ser de baja o de alta potencia. En algunos diseños modernos, el muelle disparador es sustituido por un pistón con aire o nitrógeno comprimidos. Este

tipo de armas son cargadas usando tres mecanismos distintos: mediante el conocido como cañón partido, a través de una palanca lateral, o mediante una palanca alojada bajo el cañón.



Figura 10. Mecanismos de carga en los rifles de pistón: cañón partido (izquierda), palanca lateral (medio), palanca inferior (derecha)

Generalmente, este tipo de armas requieren llevar a cabo una serie de disparos iniciales antes de alcanzar su máximo rendimiento debido al aceite de lubricación contenido en su interior. De cara a un correcto mantenimiento del arma, es altamente recomendable no amartillar el rifle hasta que no se vaya a llevar a cabo un disparo. Mantener el muelle disparador comprimido durante largos periodos de tiempo puede causar pérdidas de potencia en el arma. Otro factor a tener en cuenta es la descarga del arma en vacío. Este tipo de rifles sólo pueden ser descargados efectuando un disparo. Nunca se debe accionar el disparador sin un proyectil en la recámara, dado que la descarga del pistón en vacío puede ocasionar serios daños al mismo.

Los rifles de pistón llevan intrínseco un considerable retroceso en el disparo debido al movimiento del pistón. En los conocidos como "match rifles", principalmente utilizados en tiro deportivo, se lleva a cabo una importante reducción del retroceso mediante un diseño que permite el desplazamiento del cañón y el mecanismo interior del rifle sobre una serie de raíles [CHAP09]. También es posible encontrar otros medios menos sofisticados mediante la adición de sistemas de amortiguación, que pueden reducir considerablemente el retroceso de un rifle de pistón estándar.

#### 2.4.1.1. Funcionamiento Mecánico

Los principales componentes de un rifle de aire de pistón son el cañón (A), la cámara de compresión (B), el pistón (C) y el muelle disparador (D).



Figura 11. Principales componentes de un rifle de pistón

En los modelos de cañón partido, éste es rotado respecto su posición inicial a través de una serie de bisagras, al tiempo que empuja hacia atrás el pistón y el muelle disparador mediante un vástago articulado.

Al realizar este movimiento, la recámara queda al descubierto permitiendo así la carga del rifle e introduciendo el proyectil en la misma. Una vez el pistón alcanza la posición de armado, el fiador queda engranado dentro del mecanismo disparador.

Al tiempo que el pistón de desplaza hacia atrás, el muelle disparador es comprimido y una pequeña cantidad de aire a presión atmosférica queda alojada en el interior de la cámara. Este volumen de aire será comprimido y expulsará el proyectil fuera del cañón. Una vez se cierra el cañón, se establece un circuito cerrado desde la cámara de compresión hasta el final del puerto de transferencia donde el proyectil queda alojado.



Figura 12. Esquema del funcionamiento de un rifle de pistón en posición de reposo

Cuando el pistón alcanza el final de su recorrido durante el armado, el fiador retiene el pistón y el muelle disparador hasta que se acciona el gatillo. Cuando éste es accionado, el fiador libera el pistón el cual es empujado hacia delante por el muelle disparador. El pistón comprime el volumen de aire alojado en la cámara de compresión y éste se expande hacia el puerto de transferencia. En este punto, el aire comprimido se haya entre el pistón y el proyectil, pero cuando la presión del aire supera la inercia y la fricción del proyectil alojado en la recámara, éste es propulsado a lo largo del cañón. La rigidez y longitud del muelle, así como la cantidad de aire en la cámara de compresión, determinarán la velocidad del proyectil.



Figura 13. Esquema del funcionamiento de un rifle de pistón en posición de armado

#### 2.4.1.1. Rifles de pistón de gas

Los rifles de pistón estándar emplean la fuerza de un muelle para generar la energía que transfiere al proyectil, sin embargo, este tipo de armas presentan evidentes desventajas. El retroceso bidireccional dificulta la precisión en los disparos, no se puede dejar el arma amartillada, y el ruido mecánico durante el disparo puede resultar considerable. Los rifles de pistón de gas, o también conocidos como rifles de nitro-pistón, optimizan estos inconvenientes que presentan las armas de pistón comunes.

Un cilindro o muelle de gas utiliza un cilindro lleno de aire comprimido generalmente nitrógeno, el cual es comprimido por el pistón de forma análoga a la compresión del muelle disparador explicada anteriormente. Cuando el arma es amartillada, se incrementa la presión del gas contenido en el cilindro y el pistón queda retenido por el fiador. Una vez se acciona el mecanismo disparador, se produce la expansión del gas y el avance del pistón hacia delante impulsando el volumen de aire contenido en la cámara de compresión y propulsando el proyectil de la misma manera en que fue descrito anteriormente.



Figura 14. Vista seccional del mecanismo de disparo de muelle (arriba) y nitro-pistón (abajo)

Generalmente la mayoría de los rifles de muelle disponibles en el mercado pueden ser modificados sustituyendo éste por un cilindro de gas. Aún cuando el cilindro de gas añadirá un mayor peso al arma, las mejoras en ruido y retroceso son considerables.

#### 2.4.2. Rifles de aire pre-comprimido (PCP)

Las siglas PCP derivan de los términos ingleses Pre Charged Pneumatic, es decir, aire pre-comprimido. Las armas de PCP cuentan con un depósito de almacenamiento del aire, el cuál pasa a una válvula a través de un mecanismo de carga. Con el accionamiento del gatillo se abre la válvula y el aire queda liberado con toda su presión, ofreciendo impulso a la munición del arma que sale disparada a grandes velocidades.

Gran potencia, excelente precisión, facilidad de amartillado y un retroceso casi imperceptible son algunos de los atributos que hacen que este tipo de armas estén ganados adeptos dentro del mundo de las armas tanto de fuego como de aire. El principal inconveniente de este tipo de armas: la recarga del depósito de aire comprimido.

Dentro del mundo de las armas de aire comprimido, las de aire pre-comprimido son las que ofrecen la mayor potencia, además de incorporar en algunos modelos características como multidisparo o regulación de potencia.

Existen tres tipos diferentes de depósitos de aire comprimido para estos rifles: incorporados en la culata, incorporados en el guardamanos y, el más extendido, el depósito tubular alojado bajo en cañón.



Figura 15. Tres modelos de rifles de PCP con tres tipos distintos de depósitos de aire.

Una vez llenado el depósito de aire comprimido, a medida que vamos realizando diferentes disparos, la presión interior del depósito irá disminuyendo progresivamente dependiendo de la configuración de potencia seleccionada.

Para conseguir una repetibilidad en los disparos a medida que la presión en el depósito disminuye, las válvulas son taradas a unos ciertos valores de presión que serán los valores de presión en los que trabajara el arma. Por otro lado, también se puede añadir un dispositivo conocido como regulador, el cual se encarga que la garantizar el mismo valor de presión para cada disparo siempre que la presión en el tanque sea la mínima establecida para el mismo.

Generalmente, y en contra de lo que diría la intuición, los primeros disparos tras llenar el depósito a la máxima presión presentan velocidades por debajo de lo esperado. Las velocidades alcanzadas por los proyectiles son mayores después de una serie de primeros disparos. La razón es que, generalmente, los valores de presión máxima del depósito no permiten el correcto equilibrado del muelle interno de la válvula, por lo que ésta puede cerrar prematuramente entregando una baja carga de aire comprimido al proyectil. A medida que la presión cae en el depósito, la válvula permanece abierta durante más tiempo y una mayor cantidad de aire es liberada contra el proyectil. Esta mayor cantidad de aire comprimido se traduce en una mayor potencia y en una mayor velocidad del proyectil.

Debido a su principio de funcionamiento, las armas de PCP pueden ser monotiro o multidisparo. Rifles monotiro, como el Airforce Condor, presentan un cerrojo que abre la recámara y amartilla el arma al mismo tiempo. Por otro lado, las armas multidisparo, presentan un cargador que puede ser linear o rotatorio.



Figura 16. Tipos de cargadores: lineal (izquierda) y de tambor (derecha)

La siguiente figura representa las partes principales de un rifle estándar de aire precomprimido. En este caso, el depósito de aire (1) es del tipo tubular alojado bajo el cañón (2) del arma. En la figura, también podemos apreciar la válvula (4) y el martillo de acción (6). El cañón se haya alojado en el recibidor (3), el cual une al mismo con el alojamiento de la válvula dejando una recámara interior también conocida como puerto de transferencia. En el modelo mostrado, el depósito tubular incorpora un manómetro para medir la presión interior.

El mecanismo disparador (5) queda montado en la parte inferior del arma, y un tornillo dentado retiene el martillo después de que el cerrojo (7) haya sido usado para amartillar el rifle. Cuando se acciona el gatillo, el martillo queda liberado y, bajo la acción de un muelle previamente comprimido, golpea el vástago de la válvula abriendo la misma. Esta apertura temporal de la válvula permite la liberación de una cierta cantidad de aire comprimido que pasa a la recámara e impulsa al proyectil a lo largo del cañón.





La potencia del arma puede ser modificada bien incrementando la presión de tarado de aire en la válvula, o bien incrementando la compresión del muelle disparador como en el Airforce Condor.

La mayoría de las armas de PCP, utilizan una válvula de asiento de presión regulada. Cuando se procede a amartillar el arma, el martillo es desplazado hacia atrás hasta que el fiador queda bloqueado. La distancia desde la posición de reposo a la posición de armado es conocida como la carrera. Cuando se acciona el disparador, el martillo es liberado y éste golpea primero la recámara, la cual a su vez impacta contra el vástago de la válvula desplazándolo respecto de su asiento y permitiendo el flujo de aire. Este volumen de aire se desplaza hacia el puerto de transferencia impulsando el proyectil alojado en el mismo.



Figura 18. Cadena de disparo en un rifle de PCP

En diseños convencionales, al tiempo que la presión en el depósito de aire disminuye, el tiempo de apertura de la válvula se incrementa debido a la menor resistencia que ofrece el aire comprimido en el interior del depósito sobre la válvula. Por lo tanto, cuanto mayor es el tiempo de apertura de la válvula, mayor es la cantidad de aire a menor presión que pasa al puerto de transferencia. De este modo, el resultado en un rifle convencional sin regulador instalado es un pico en la velocidad de salida del proyectil (conocido como "sweet spot" o "punto dulce") antes de que esta comience a disminuir en los posteriores disparos [LANE15].

#### 2.4.2.1. El regulador

Algunas armas de PCP incorporan en la válvula lo que se conoce como regulador y que permite una mayor estabilidad en los valores de velocidad. El regulador consiste en una pre-cámara de aire comprimido, en el interior de la cual el valor de presión permanece constante de acuerdo a la presión a la que este tarada. Una vez queda accionada la válvula de disparo, se libera el aire en el interior de esta pre cámara por lo que el arma ofrece velocidades muy similares para un rango concreto de presión el depósito de aire.



Figura 19. Diagrama del cuerpo de un regulador



Agrupación de impactos para diferentes disparos



Agrupación de impactos para diferentes disparos

#### 2.4.3. Comparativa: Rifles de pistón vs. Rifles de aire pre-comprimido

La siguiente tabla muestra una comparativa sobre los diferentes parámetros generales que caracterizan a las armas de aire comprimido.

	Rifles de pistón	<b>Rifles de PCP</b>
Precisión	Media	Muy alta
Retroceso	Alto	Bajo
Multidisparo	No	Si
Ruido	Medio	Bajo
Diseño compacto	No	Si
Equipo adjunto requerido	No	Si
Precio	Bajo	Alto
Disponibilidad en el mercado	Muy alta	Baja

Tabla 1. Comparativa entre rifles de pistón y PCP

Generalmente, debido a sus características generales, los rifles de aire pre-comprimido son la primera opción de los tiradores profesionales, mientras que los rifles de pistón se centran en unos tiradores más principiantes.

# **3. Airforce Condor**

El mecanismo de funcionamiento de las armas de aire pre-comprimido, se basa en la liberación de una cierta cantidad de aire en la recámara de las mismas en la cual ha sido situado un proyectil. Esta cantidad de aire a cierta presión propulsa el proyectil fuera del cañón a relativas altas velocidades. En la práctica, este tipo de armas deben incorporar su propia fuente de aire comprimido para ser realmente operativas. Típicamente, esta fuente es un depósito pre-cargado antes de ser colocado en el arma o un depósito fijo montado en la misma. En ambos casos, el depósito contiene una cantidad limitada de aire comprimido que debe ser repuesta tras realizar un número de disparos.

En el caso de aquellas armas cargadas manualmente, la recámara debe ser accesible al usuario para la inserción del proyectil en el orificio correspondiente. Es conveniente además, que este tipo de armas permitan ser cargadas usando los dedos del usuario y considerando posibles extras como guantes.

Una válvula se incorpora generalmente a la salida del depósito de aire, permitiendo la descarga de una cierta cantidad de este gas comprimido al accionar el disparador. Sin embargo, hasta que se produzca la descarga del arma, el conjunto de válvula debe quedar perfectamente acoplado a la recámara, proporcionando el sellado del puerto de transferencia entre el depósito y el inicio del cañón. Es de vital importancia garantizar un correcto sellado, de forma que se maximice la cantidad de energía transferida del aire comprimido al proyectil. Además, cuanto mejor sea este sellado, menor será el nivel de ruido debido a la descarga del gas a través de la válvula.

La cantidad de partes y, particularmente, la cantidad de partes de precisión, es un factor crítico a considerar en los costes de producción de armas de aire comprimido. En este tipo de armas, la cantidad de componentes de precisión influye en gran medida en la precisión y repetibilidad del arma. Por otro lado, mientras algunos usuarios ven este tipo de armas como juguetes, otros segmentos del mercado demandan en estas el mayor nivel de precisión y rendimiento posibles debido a que son usadas en competición, caza y otro tipo de eventos deportivos. Las armas de aire comprimido, a su vez, ofrecen una serie de ventajas frente a las armas de fuego convencionales, entre las que cuentan el no requerir licencia para su uso, el bajo coste operativo, o los bajos niveles de ruido generados.

### 3.1. Especificaciones técnicas

El rifle elegido para este proyecto es el rifle de aire pre-comprimido de mayor potencia disponible a día de hoy en el mercado: el Airforce Condor. Este rifle es íntegramente producido en la factoría de Airforce en Forth Worth (Texas), y es capaz de obtener una excelente precisión a largo alcance usando los proyectiles más pesados del mercado.



Figura 20. Diagrama de las principales partes del Airforce Condor

El Airforce Condor ha sido optimizado para el uso de aire comprimido como fuente de energía. La máxima presión del depósito de aire comprimido es 206 bares e incorpora una válvula de seguridad en caso de que esta presión sea superada. La capacidad de este depósito es de 490 centímetros cúbicos y permite efectuar unos 15 disparos a máxima potencia y alrededor de unos 30 a mínima potencia [AIRF07].

Peso:	2.95 kg
Longitud:	968.38 mm
Cañón:	610 mm
Máxima Presión Depósito:	206 bar
Volumen depósito:	490 сс
Rango de velocidades*:	180–400 m/s
Calibres:	4.5 mm, 5.0 mm,
	5.5 mm, 6.35 mm

\* La velocidad de salida del proyectil depende de variables como el calibre, peso, presión del depósito y ajuste de potencia del arma como será analizado en las siguientes secciones de este documento.

### 3.1.1. Ajuste de potencia

La potencia del rifle puede ser ajustada a través de una rueda que se aloja en el lateral del arma. Al girar esta rueda se varía la pre-compresión del muelle que impulsa el martillo contra el conjunto recámara-válvula. Una mayor pre-compresión de este muelle desemboca en una mayor fuerza de impacto al final de la carrera y, por lo tanto, una mayor apertura de la válvula con la consiguiente liberación de una mayor cantidad de aire comprimido. Debido a los diferentes pesos y calibres de proyectiles disponibles en el mercado, es recomendable el uso de un cronógrafo para la calibración óptima de potencia para el rifle.

### 3.1.2. Secuencia de disparo

El armado del rifle se lleva acabo presionando el cerrojo hacia delante hasta que la recámara queda totalmente abierta. Al hacer este movimiento el martillo queda retenido por el fiador y el seguro queda accionado. A continuación, se procede a introducir el proyectil en el orificio que coincide con el final del cañón y se cierra la recámara. Finalmente, para llevar a cabo el disparo, se presiona la pestaña que desactiva el seguro y se presiona el gatillo.

### 3.2. Funcionamiento mecánico

Muchos de los diseños de armas de aire comprimido requieren una gran cantidad de piezas de precisión para garantizar una adecuada precisión y repetibilidad. Generalmente, estas partes de precisión se localizan en los mecanismos del disparador, válvula y recámara, y suponen un fuerte incremento en el coste de fabricación de este tipo de armas.

El Airforce Condor ofrece un diseño que proporciona un elevado rendimiento del rifle minimizando el número de piezas de precisión. En los diseños iniciales, se comenzó empleando un cañón deslizable que era impulsado mediante un muelle contra el vástago de la válvula. Este diseño cumplía con los requisitos de bajo coste y precisión por la simplicidad del diseño, pero presentaba el inconveniente de que la recámara permanecía abierta durante las etapas de carga y disparo del rifle. En muchas situaciones, el usuario del arma desea cargar la misma y dejarla lista para el disparo durante un determinado periodo de tiempo. El diseño inicial de recámara descubierta tenía unas ciertas desventajas como la exposición a los elementos.

Este diseño original fue mejorado en el Airforce Condor pero manteniendo facilidad en la carga, bajos niveles de ruido durante el disparo, precisión, eficiencia y fiabilidad. Esta mejora vino mediante la introducción de una recámara deslizable que permitía ser abierta para realizar la carga del proyectil y, a continuación, ser cerrada para el posterior disparo. Este nuevo diseño además mantenía un bajo número de piezas maquinadas de precisión [CASL98].

De este modo, el Airforce Condor emplea un diseño de recámara deslizable que opera entre una primera posición de carga y una segunda posición de disparo. Esta recámara sirve para comunicar la fuerza de impacto del martillo a la válvula del depósito de aire comprimido provocando la apertura de la misma. Por otro lado, es de vital importancia garantizar un correcto sellado para el paso del gas a través del puerto de transferencia que une la boca de salida de la válvula con el extremo inicial del cañón.

El martillo es armado manualmente mediante el empuje de la recámara deslizable contra el mismo lo que, a su vez, provoca la compresión del muelle disparador. Por otro lado, el martillo incluye un trinquete o fiador que queda acoplado en el mecanismo disparador para el consiguiente disparo. Además, la recámara deslizable incorpora un cerrojo exterior para facilitar los movimientos de armado y sellado por el usuario. Por último, durante este proceso de armado, se produce la activación del seguro del arma el cual bloquea el gatillo debiendo ser manualmente desactivado antes de efectuar el disparo.

Una vez el rifle esta armado, la recámara se desplaza a su posición inicial, cerrando la misma y quedando sellado el puerto de transferencia. Esta recámara queda fija mediante la rotación del cerrojo, el cual queda acoplado en una ranura creada para tal propósito.

Al accionar el mecanismo disparador, el fiador acoplado al mismo queda liberado y el martillo es impulsado por la fuerza del muelle disparador contra la recámara deslizable. Esta recámara a su vez transmite esta fuerza contra el vástago de la válvula provocando la apertura de la misma y la liberación de una cierta cantidad de aire comprimido. El gas comprimido fluye a través del puerto de transferencia hasta el extremo inicial del cañón donde se haya alojado el proyectil, expulsando al mismo y descargando el arma.

La válvula se encuentra conectada a la salida del depósito de gas comprimido y alineada con el orificio del cañón. Además, el armazón del arma incorpora una extensión tubular del cañón que facilita la inserción del proyectil cuando el arma ha sido cargada. Este tubo recibidor es concéntrico con el cañón y su diámetro interior coincide con el calibre del proyectil para el que haya sido diseñado el rifle.

En el interior del cuerpo de la válvula, se halla un émbolo interior, el cual se encuentra cargado bajo la acción de un muelle y sellando el conducto de salida. Por otro lado, el exterior del cuerpo de la válvula se encuentra roscado directamente al depósito de aire comprimido.

En el proceso de disparo, una vez la recámara ha impactado contra el vástago de la válvula provocando la apertura de la misma, la fuerza del muelle interior de la válvula así como la del gas comprimido causa el desplazamiento del émbolo a su posición inicial de reposo, cerrando el conducto de la válvula e interrumpiendo así el flujo de gas comprimido.

### 3.2.1. Descripción detallada de las partes

La Figura 21 representa la sección principal del cuerpo del rifle mostrando a su vez el armazón, el cual está formado por un tubo de aluminio extruido. El depósito de aire comprimido se haya acoplado a la parte posterior del armazón. Este también presenta una empuñadura que junto con el guardamanos son empleados para sostener el arma durante el disparo. En la parte posterior del depósito de de gas comprimido se haya la culata del rifle, cuya misión es proporcionar al usuario una superficie confortable para apoyar el hombro mientras opera el arma.

Un segundo guardamanos se haya extruido en la parte superior del armazón proporcionando protección al cerrojo y recámara del rifle, así como alojando a su vez el rail del visor óptico. En frente de la empuñadura se sitúa el protector del gatillo, el cual aloja en su interior el gatillo y el seguro, los cuales serán descritos en detalle posteriormente. La boca del arma en la Figura 21 queda acoplada en una cubierta, quedando adecuadamente protegida y proporcionando un orificio para el paso del proyectil cuando el arma es descargada.



Figura 21. Sección principal del cuerpo del Airforce Condor

La Figura 22 muestra una vista frontal del rifle. Se puede apreciar el guardamanos superior con la la montura para el visor óptico, así como la empuñadura y el guardamanos inferior en la parte inferior. Por otro lado, es claramente apreciable como el depósito de aire comprimido queda totalmente concéntrico al eje del cañón de rifle.



Figura 22. Vista frontal del cuerpo del Airforce Condor

A continuación, las Figuras 23, 24 y 25 muestran la sección transversal del arma a lo largo de su línea central. La única diferencia entre estas tres figuras es el punto de operación del arma.

La Figura 23 muestra la sección transversal del rifle cuando este está armado y con la recámara cerrada listo para efectuar el disparo. El armazón del arma está construido en un cuerpo tubular de aluminio, presentando un carril inferior extruido en el mismo para el montaje del guardamanos u otros accesorios adicionales como un puntero láser o una linterna.

La parte trasera del armazón se encuentra roscada para permitir el ensamblaje de la válvula de disparo y, a su vez, la válvula de disparo se encuentra roscada para permitir el ensamblaje del depósito de aire comprimido. En la parte frontal del armazón, se haya un orificio roscado para situar la cubierta del cañón, cuya misión es proteger al mismo así como proporcionar una apariencia más estética al rifle.

Montado concéntricamente dentro de la sección tubular del armazón se halla el cañón del arma, el cual es fabricado en acero y se halla estriado en su interior para proporcionar la rotación a los proyectiles (spin) que garantizará repetibilidad en sus trayectorias. El estriado del cañón forma parte de la balística interna que será estudiada en las secciones posteriores de este documento. El cañón se encuentra rígidamente fijado al armazón del rifle a través de una montura que también ejerce de guía para el muelle disparador que impulsa al martillo.

La recámara se desliza a lo largo del tramo final del cañón, separados por una junta tórica que se encarga de garantizar el sellado entre ambas partes evitando pérdidas de

gas durante el disparo. Por otro lado, la recámara deslizable incorpora un cerrojo roscado a su sección tubular exterior que permite el desplazamiento manual de la misma por el usuario. Esta recámara queda bloqueada en su posición de armado mediante la rotación del cerrojo quedando alojado en el interior de una muesca específicamente creada en el armazón del arma para este propósito. En la Figura 23, la recámara se halla cerrada en posición de disparo, reposando contra el vástago de la válvula y separados por otra junta tórica para evitar fugas de gas durante el disparo.

Por último, en esta Figura 23, podemos apreciar como el extremo de la pieza de armado del mecanismo disparador bloquea el fiador del martillo, manteniendo este a una cierta distancia de la recámara, y con el muelle disparador comprimido.



Figura 23. Sección transversal del Airforce Condor en posición de disparo

La Figura 24 muestra la sección transversal del rifle en el momento del disparo. En esta figura podemos apreciar el martillo golpeando la recámara, y ésta a su vez al vástago de la válvula, la cual se halla abierta.

La descarga del arma se produce mediante la actuación del mecanismo disparador al presionar el gatillo. Este mecanismo disparador se halla constituido por cuatro piezas, tres de las cuales permanecen constantemente bajo la acción de tres muelles diferentes. Estas piezas son: el gatillo, el actuador del gatillo, el enlace fiador y el retenedor del martillo. Por otro lado, al margen del mecanismo disparador se encuentra el mecanismo del seguro, el cual deja bloqueado al anterior cuando se amartilla el arma. Este seguro consta de un actuador y de un fiador que se encarga de bloquear el movimiento del retenedor del martillo.

La actuación del mecanismo disparador se lleva a cabo en una serie de movimientos del mismo. En primer lugar, se desactiva el seguro mediante el movimiento hacia atrás del actuador del mismo. Esto provoca el desplazamiento del fiador del seguro, el cual se alinea con el retenedor del martillo permitiendo la rotación del mismo y la liberación del fiador del martillo. Una vez que el mecanismo del seguro ha sido desactivado, se presiona el gatillo provocando la rotación del actuador en sentido horario como se muestra en la Figura 24. La rotación del actuador del gatillo a su vez ocasiona la rotación del enlace fiador, el cual se desacopla del retenedor del martillo permitiendo su

movimiento. Este retenedor, actuando bajo la acción de un muelle, libera el fiador del martillo permitiendo su movimiento y consecuentemente descargando el arma.

Como ha sido descrito previamente, el último efecto de esta acción del mecanismo disparador es que el martillo golpea a la recámara, la cual transfiere la fuerza y momento del mismo al vástago de la válvula. A continuación, se produce la apertura de la válvula con la consiguiente liberación del aire comprimido que fuerza la salida del proyectil a través del cañón. La fuerza del muelle interior de la válvula, junto con el gas comprimido del depósito, provocan el retorno de la recámara a su posición inicial, cesando así el flujo de gas.



Figura 24. Sección transversal del Airforce Condor durante el disparo

La Figura 25 muestra la sección transversal del rifle cuando este está armado, con la recámara abierta, y listo para insertar el proyectil. Esta posición se alcanza rotando el cerrojo, quedando este fuera de la ranura y, a continuación, empujando la recámara hacia delante hasta que el rifle quede amartillado. Esta acción deja expuesto el final del cañón, permitiendo al usuario la inserción del proyectil en dicho orificio. Además, cuando el martillo esta cerca del final de su carrera, el fiador del mismo queda bloqueado bajo la acción del retenedor del martillo en el mecanismo disparador. El ligero movimiento hacia delante del retenedor provoca el desplazamiento del fiador del seguro con la consiguiente activación del mismo.

Una vez que el usuario ha introducido el proyectil en el orificio del cañón, la recámara puede ser desplazada de nuevo a su posición inicial y el arma quedará armada como se ha descrito en la Figura 23.



Figura 25. Sección transversal del Airforce Condor en posición de armado

La Figura 26 muestra la vista en planta de la sección transversal del armazón del arma en posición de sellado. En esta figura, se puede apreciar como el final del puerto de transferencia queda acoplado con el vástago de la válvula. A su vez, la Figura 26 muestra la ranura en forma de T efectuada en el armazón del arma para permitir el guiado del cerrojo en sus diferentes recorridos durante la carga y disparo del arma.



Figura 26. Vista en planta de la sección transversal del armazón del Airforce Condor

La Figura 27 muestra la sección transversal de la recámara deslizable, así como su vista frontal. Esta recámara, se trata de un cuerpo cilíndrico fabricado en un material termoplástico, que presenta un conducto de gas en su interior conocido como puerto de transferencia. El extremo inicial de este puerto de transferencia está diseñado para quedar acoplado en la boca de la válvula de disparo, mientras que el otro extremo lo hace en el final del cañón del rifle. Ambos extremos del puerto de transferencia presentan una ranura anular, en la que queda acoplada una junta tórica que garantiza el sellado del puerto de transferencia evitando, fugas de gas durante la descarga.

El cerrojo queda acoplado en la recámara deslizable a través de un tornillo que une ambas piezas. En la Figura 27 puede observarse como un segundo orificio es taladrado en la recámara con el fin de hacer accesible el paso de un destornillador hasta la cabeza del tornillo. Este segundo orificio queda ubicado tras la segunda junta tórica de modo que no se produzcan fugas de gas a través de el en el momento del disparo.



Figura 27. Sección transversal de la recámara deslizable del Airforce Condor

La Figura 28 muestra la sección transversal del martillo, así como su vista frontal. Este martillo se trata de un cuerpo tubular fabricado en un material termoplástico con un diámetro exterior ligeramente inferior al diámetro interior del armazón del arma. Este juego de diámetros es el que permite que el armazón del arma sirva de guía en el movimiento del martillo. Por otro lado, el martillo incorpora una ranura inferior que permite el movimiento del retenedor del martillo a través de ella, e impide a su vez la rotación del mismo durante su movimiento longitudinal. Finalmente, próximo a uno de los extremos, se halla extruido el fiador que permite el bloqueo del martillo cuando este es desplazado hacia su posición de armado.



Figura 28. Sección transversal del martillo del Airforce Condor

La Figura 29 muestra la sección transversal del mecanismo disparador del arma. Los principios de funcionamiento de este mecanismo han sido descritos anteriormente por lo que, a continuación, solo se detallarán las piezas que lo componen. El gatillo se halla fijado a su actuador, el cual a su vez se encuentra montado en el armazón del arma a través de un eje que permite su movimiento rotatorio. Este actuador del gatillo se encuentra constantemente bajo la acción de un muelle que hace que el gatillo se quede fijo en una posición adelantada hasta que ser presionado por el usuario del rifle.

Por otro lado, el actuador del gatillo se halla acoplado al enlace fiador, que nuevamente se encuentra fijo al armazón del arma a través de un eje que permite su rotación. Este enlace fiador también se halla bajo la acción de un muelle independiente que lo presiona en sentido horario.

Por último, el retenedor del martillo se encuentra fijo al armazón mediante una articulación que permite su deslizamiento y rotación, y bajo la acción de un muelle que lo fuerza en sentido antihorario.

El fiador del seguro en montado en el armazón del arma permitiendo su movimiento longitudinal. Cuando el seguro esta activado, este fiador queda acoplado al retenedor del martillo impidiendo la rotación del mismo y dejando el arma inoperativa. Este fiador, a su vez, se halla bajo la acción de un muelle que provoca su movimiento cuando se amartilla el rifle. Por último, el fiador del seguro se encuentra unido al actuador del mismo, de forma que este mecanismo puede ser operado por el usuario desde el exterior del armazón.



Figura 29. Sección transversal del mecanismo disparador del Airforce Condor

La Figura 30 muestra la sección transversal de la válvula. La válvula del rifle es un tipo conocido como válvula de asiento, la cual, en ausencia de una fuerza exterior, se halla cerrada debido a la acción de su muelle interior.

El cuerpo exterior de la válvula presenta dos roscas distintas en cada uno de sus extremos: la primera para el acoplado de la válvula al depósito de gas comprimido, y la segunda para el acoplado de la misma al armazón del rifle. El cuerpo interior de la válvula presenta una cámara interior, la cual aloja un cilindro sellado a través de una junta tórica para evitar fugas de gas del depósito. Este cilindro, el cual actúa como asiento de la válvula, aloja a su vez un émbolo interior que se encuentra directamente unido al vástago de la válvula. El émbolo reposa en el asiento de la válvula debido a la acción de un muelle retenedor. Por otro lado, el vástago de la válvula presenta un orificio interior por el cual fluye el aire comprimido cuando el émbolo se desplaza de su asiento. Este mecanismo de válvula de asiento puede ser sustituido por otro similar que cumpla la misma función.



Figura 30. Sección transversal del cuerpo de la válvula del Airforce Condor

100	Cuerpo de arma	156	Ranura del cerrojo
102	Armazón	158	Espolón del cerrojo
104	Depósito de gas comprimido	160	Junta tórica
106	Empuñadura	162	Junta tórica
108	Guardamanos inferior	164	Tornillo del cerrojo
110	Culata	166	Orificio de paso de tornillo
112	Guardamanos superior	168	Ranura de paso del fiador
114	Cubierta del cañon	170	Actuador del gatillo
116	Recámara deslizable	172	Enlace fiador
118	Cerrojo	174	Retenedor del martillo
120	Gatillo	176	Fiador del seguro
122	Actuador del seguro	178	Actuador del seguro
124	Apertura de la recámara	180	Muelle del actuador del gatillo
126	Orificio del cañón	182	Muelle del enlace fiador
128	Montura del visor	184	Muelle del retenedor del martillo
130	Martillo	186	Muelle del fiador del seguro
132	Fiador del martillo	188	Muelle del actuador del seguro
134	Muelle disparador	190	Alojamiento del disparador
136	Válvula de asiento	192	Cuerpo de la válvula
138	Vástago de la válvula	194	Muelle de la válvula
140	Asiento del vástago	196	Retenedor del muelle de la válvula
142	Asiento del cañón	198	Émbolo
144	Puerto de transferencia	200	Conducto interior del vástago
146	Proyectil	202	Asiento de la válvula
148	Mecanismo disparador	204	Junta tórica
150	Montura del cañón	206	Roscado válvula-depósito
152	Ranura de la cubierta del cañón	208	Roscado válvula-armazón
154	Protector del gatillo		

### 3.2.2. Listado de piezas

## 4. Despresurización de depósitos de gas

Las armas de PCP se basan en el empleo de la energía contenida en un depósito de aire comprimido para propulsar un proyectil a elevadas velocidades. Para comprender este proceso, primero debemos establecer un estudio termodinámico del depósito de gas como fuente finita de energía, y del gas como fluido de trabajo. Debido a que el rendimiento del arma se basa en gran medida en el proceso de descarga de este gas, se procederá a realizar un detallado estudio del mismo, tratando de identificar y modelar las principales variables involucradas.

### 4.1. Fundamentos físicos

Antes de proceder al estudio de la descarga del depósito de aire comprimido, llevaremos a cabo una breve introducción sobre los conceptos básicos aplicados a los gases.

### 4.1.1. Presión

La presión es el cociente entre la fuerza normal aplicada sobre un cuerpo y la superficie sobre la que incide. De esta forma obtenemos esta fórmula fundamental:

$$P = \frac{F}{S} \tag{1}$$

Para apreciar más intuitivamente los niveles de presión con los que vamos a trabajar durante este proyecto, se presentan algunos datos sobre las presiones a las cuales están sometidos los fluidos en diferentes instalaciones o depósitos industriales.

Elemento	Fluido	Presión
Extintor de incendios	Agua/Polvo	14-20 bar
Instalación hidráulica en barcos	Aceite	245 bar
Instalación de calefacción en el hogar	Agua	1 bar
Instalación neumática industrial	Aire	9 bar
Depósitos de rifles de PCP	Aire	206 bar

Tabla 2. Valores de presión en diferentes aplicaciones industriales y domesticas

Debemos conocer los diferentes conceptos relacionados con la presión. El primero de ellos es la presión atmosférica, que es la presión ejercida sobre todos los cuerpos por los gases contenidos alrededor de la Tierra, que no escapan al espacio exterior debido a la fuerza de la gravedad terrestre, y forman una envoltura relativamente delgada alrededor de ésta. Torricelli, con su famoso experimento, determinó que, a nivel del mar, la atmósfera ejerce la misma presión que una columna de Mercurio de 760mm de altura.

Para poder tener valores de presión definidos a pesar de las variaciones climatológicas, la norma DIN ha definido un valor de presión de referencia [BUEN10]. La presión atmosférica normal a nivel de mar comprende 1013 mbar (equivalente a 760 mmHg). La atmósfera estándar se define por la Organización Internacional de Aviación Civil: la presión y temperatura al nivel del mar es 1013.25 milibares y 288 K (15° C).

También tenemos la presión absoluta, que es la que soporta un sistema respecto al cero absoluto. Decimos que existe sobrepresión si la presión absoluta es superior a la atmosférica, y depresión si esta es menor. La sobrepresión y la depresión son la presión relativa. Hay que tener en cuenta, que tanto la presión absoluta (Pabs) como la presión relativa (Prel) están en función de la presión atmosférica (Patm).

$$P_{abs} = P_{atm} + P_{rel} \tag{2}$$

El cero del manómetro de nuestro rifle de aire pre comprimido es la presión atmosférica, la cual varía con las condiciones climatológicas.

#### 4.1.2. Leyes de los gases

Las condiciones de un gas se definen mediante tres variables de estado, que son: Presión absoluta (P), volumen específico (v) o densidad ( $\rho$ ), y temperatura (T). Cuando se conocen dos de ellas, queda determinada la condición del gas. A esta conclusión se llegó a través de la experimentación y las leyes que se enuncian a continuación en la siguiente tabla:

Ley de Boyle- Mariotte [T = cte]	$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 = Cte$	
Ley de Charles Gay- Lussac [P = cte]	$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} = Cte$	
Ley de Amonton [V = cte]	$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2} = Cte$	
Ley de Dalton (de las presiones parciales)	La presión de una mezcla de gases es la suma de presiones parciales de los gases constituyentes. La presión parcial es la que ejercería cada gas si ocupara él solo el volumen de la mezcla.	
Ley de Amagat	El volumen de una mezcla de gases es igual a la suma de los volúmenes parciales que los gases constituyentes ocuparían si estuviera cada uno a la presión de la mezcla.	
Ley de Avogadro	$\frac{V_1}{n_1} = \frac{V_2}{n_2} = Cte$	
Ley de Poisson [Proceso adiabático]	$P \cdot V^{K} = P_{0} \cdot V_{0}^{K} = Cte$ K: exponente isoentrópico (c <sub>p</sub> /c <sub>v</sub> ). Varía con P y T, aunque se suele asumir constante. Para gases monoatómicos, K=1,66; Biatómicos, K=1,40 (aire).	

Tabla 3. Leyes de los gases

La composición química del aire comprimido hace que lo podamos tratar como un gas ideal. Si usamos las leyes anteriormente descritas y las combinamos, a través de desarrollos matemáticos, llegaremos a la siguiente fórmula:

$$\frac{P_0 \cdot V_0}{T_0} = \frac{P \cdot V}{V} = cte \tag{3}$$

La fórmula es la general para los gases ideales. Sustituyendo todas las leyes en una misma fórmula, y teniendo en cuenta que un mol de gas en condiciones estándar ocupa un volumen de 22,4 litros, se puede demostrar que:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \tag{4}$$

Con *P* la presión absoluta en atmósferas, *V* el volumen en litros, *n* el número de moles, *R* constante e igual a 0.082 (atm\*L)/(K\*mol) y *T* la Temperatura en Kelvin.

Es importante saber que se definen unos estados de referencia que se usan a la hora de realizar cálculos mediante estas ecuaciones, y son las denominadas condiciones normales o estándar, término definido por la IUPAC (International Unión of Pure and Applied Chemistry) que considera una temperatura de 0 °C (273,15 K) y una presión absoluta de 100 kPa (0,986 atm, 14,504 psi). Existen otras condiciones estándar, como la versión del NIST (*National Institute of Standards*) en la que la temperatura de referencia es de 20 °C (293,15 K) y la presión absoluta de 101,325 kPa (1 atm, 14,696 psi) [BUEN10]. Estas últimas serán las que emplearemos en las próximas secciones para los cálculos analíticos y numéricos.

#### 4.1.3. Termodinámica del volumen de control

La elección del sistema termodinámico puede interesar hacerla para una cantidad de sustancia constante dada conocida como masa de control, o para la cantidad de sustancia que en cada instante esté dentro de un recinto dado limitado por paredes físicas o imaginarias. El análisis de estos últimos se llama de volumen de control, de sistema abierto o de sistema de flujo, y representa nuestro caso de interés para el estudio del depósito de aire comprimido de nuestro rifle.

Los sistemas abiertos suelen ser los de mayor interés práctico pues facilitan el estudio del flujo de fluidos a través de conductos, válvulas de restricción, cambiadores de calor, compresores y turbinas rotodinámicas, cámaras de mezcla, cámaras de combustión, reactores químicos de flujo, ondas de choque, llamas, etc [MART92].

En este apartado nos vamos a limitar al estudio de un sistema simple compresible, el cual está constituido por una sustancia de composición fija (puesto que no hay difusión de especies ni reacciones química), de propiedades isotrópicas y sin cargas eléctricas ni magnéticas. Para este sistema y tomando una referencia espacial galileana, el único campo de fuerzas aplicado además de la limitación del volumen es un campo gravitatorio uniforme, y la ecuación energética fundamental es dU = TdS - pdV.

La presurización y despresurización de depósitos es un ejemplo típico de análisis no estacionario de un volumen de control. Si nos limitamos al caso de un depósito rígido con un solo orificio de entrada o salida en el cual se supone movimiento unidimensional y uniformidad termodinámica en la sección, conteniendo una sustancia en cantidad m variable con el tiempo (llenado/vaciado), las ecuaciones de la evolución serán:

Balance másico:	$dm = dm_e$
Balance energético:	$d(me) = dQ + dW + h_e dm_e$
Generación de entropía:	$dS_{gen} = d(ms) - \int_{A_{VC}} \frac{dQ}{T} - s_e dm_e \ge 0$

En la carga/descarga rápida se puede despreciar dQ, y como dW = 0 por ser recipiente rígido sin partes móviles, queda  $d(me) = h_e dm_e$ , lo que significa que la energía que contiene nuestro gas es aquella que posee a la salida de nuestra bomba o compresor.

Por otro lado, la descarga rápida (dQ = 0) de un depósito rígido (dW = 0), a diferencia de la carga donde el chorro está en el interior del sistema, puede suponerse isentrópica ya que la degradación de energía mecánica por fricción será despreciable al ser las velocidades interiores pequeñas excepto cerca de la boca de salida, y aún allí sólo habrá gradientes cerca de las paredes. El caso de estudio en el que se centra este documento, es un proceso rara vez estudiado, que se corresponde con una descarga escalonada del depósito de aire comprimido con grandes diferencias de presión entre aguas arriba y abajo del orificio de salida, y con tiempos reducidos de apertura del mismo.

Por otro lado, dentro del proceso de descarga del depósito de aire comprimido de nuestro rifle de PCP, debemos considerar el movimiento del gas a través de los conductos que conectan el mismo con el proyectil: conducto de la válvula y puerto de transferencia. En estos se supone que no se produce adición de calor o trabajo por lo que dq = 0 y dW = 0 y, en el caso de un único orificio, queda  $\Delta h_t = 0$  debido a que los balances de masa y energía son nulos en el interior de los mismos.

En conductos de sección constante, como son los que conectan el orificio del depósito con el proyectil, no se puede superar la velocidad del sonido del gas, ya que para alcanzar movimiento supersónico se requiere una tobera convergente-divergente.

## 4.2. Modelo analítico de la descarga del depósito de aire comprimido

El objetivo del análisis de la descarga del depósito de un arma de PCP es predecir la presión que sale del mismo como una función del tiempo. Para alcanzar dicho objetivo, debemos aplicar la teoría del volumen de control presentada en el apartado previo. De este modo, seleccionamos el volumen de control que se encuentra justo dentro de las paredes interiores del depósito donde queda alojado el aire comprimido.



Figura 31. Representación esquemática del volumen de control empleado durante la descarga del depósito de aire comprimido

Durante el estudio analítico de este proceso de descarga, se llevan a cabo una serie de suposiciones:

- 1. Las propiedades del gas en el depósito son espacialmente uniformes para cualquier instante de tiempo, como por ejemplo la suposición de estado cuasiestatico o uniforme.
- 2. La velocidad media del gas en el interior del depósito es nula.
- 3. El orificio de salida del depósito se modela como una tobera convergente ideal donde el flujo a través de su garganta se considera isentrópico.
- 4. Se considera flujo unidimensional a través de la tobera.
- 5. Se desprecia el efecto de la energía potencial gravitatoria.
- 6. Se desprecian los esfuerzos cortantes en el interior del volumen de control.
- 7. El gas se considera caloríficamente perfecto.

A la hora de estudiar la descarga de un depósito de gas comprimido se pueden llevar a cabo dos suposiciones en lo referente a su proceso de expansión termodinámica:

- **Expansión adiabática:** representa un buen modelo para procesos de descarga total del depósito rápidos donde no hay tiempo suficiente para una significante transmisión de calor entre las paredes del depósito y el gas.
- **Expansión isotérmica:** apropiada para procesos de descarga lentos donde hay suficiente tiempo para la transmisión de calor y mantener la temperatura del gas en el depósito constante. Este es nuestro caso de interés debido al funcionamiento del rifle, donde se liberan pequeñas cantidades de aire comprimido en cada disparo y con un intervalo temporal considerable entre los mismos.

Aplicando la integral de continuidad y las ecuaciones de energía al volumen de control, las propiedades termodinámicas del gas en el depósito obedecen un comportamiento isentrópico.

Además, para elevados valores de presión del gas en el interior del depósito en comparación con los valores de presión aguas debajo de la tobera, esta se encontrará estrangulada durante los instantes iniciales del proceso de descarga [DUTT97]. En nuestro caso, debido a que la válvula de descarga permanece abierta durante intervalos de tiempo muy reducidos, el flujo a través del conducto de la válvula permanecerá estrangulado durante el proceso de disparo.

#### 4.2.1. Flujo crítico o estrangulado

Cuando se produce un flujo de gas a través de un orificio puede suceder que la velocidad del gas alcance condiciones sónicas. Esta situación ocurre cuando la presión aguas abajo del orificio (P2) es menor o igual que el 52.8 % de la presión aguas arriba (P1) [OKEE03]. La velocidad del sonido es una función del estado de equilibrio termodinámico, como se desprende de su definición:

$$c = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial s}}\Big|_{s} = \sqrt{\gamma RT}$$
(5)

Para el flujo de aire a través de un orificio la velocidad crítica o velocidad del sonido será de 345 metros por segundo, asumiendo una temperatura de admisión de 20 grados centígrados.



Figura 32. Condiciones de presiones absolutas en aguas arriba y debajo del orificio para que el gas alcance la velocidad del sonido al paso a través de él.



Figura 33. Velocidad del aire frente al cociente de presiones entre aguas arriba y abajo del orificio de salida.

Asumiendo que nuestra presión interior del depósito va a ser siempre muy superior a la presión atmosférica a la salida de la válvula, consideraremos que el flujo de aire a través de la misma se hallará siempre estrangulado durante el proceso de disparo.

Para determinar las ecuaciones analíticas para este flujo crítico, primero se procede a aplicar la integral de continuidad y se substituye en la formula de Fliegner para el flujo másico crítico y, a continuación, se integra la resultante ecuación diferencial ordinaria [DUTT97]. De este modo, se obtienen las expresiones que relacionan la presión a la salida y en el interior del depósito en función del tiempo para las expansiones adiabática e isotérmica:

Solución adiabática para flujo crítico o estrangulado:

$$\frac{P_{salida}}{P_{interior}} = \left[1 + \left(\frac{\gamma - 1}{2}\right) \cdot \left(\frac{\gamma + 1}{2}\right)^{-\frac{(\gamma + 1)}{2(\gamma - 1)}} \cdot \frac{A \cdot c}{V} \cdot t\right]^{-\frac{2\gamma}{\gamma - 1}}$$
(6)

Solución isotérmica para flujo crítico o estrangulado:

$$\frac{P_{salida}}{P_{interior}} = exp\left[-\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{-\frac{(\gamma+1)}{2(\gamma-1)}} \cdot \frac{A \cdot c}{V} \cdot t\right]$$
(7)

Donde,

- $\gamma \equiv$  Coeficiente de dilatación adiabática del gas.
- $A \equiv$  Area del conducto de salida.
- $c \equiv$  Velocidad del sonido del gas.
- $V \equiv$  Volumen del depósito de gas comprimido.

 $t \equiv$  Tiempo.

#### 4.2.2. Resultados del modelo analítico de la descarga del depósito

Consideramos los siguientes parámetros asociados al depósito con máxima carga, una temperatura ambiente de 20°C y un orificio de salida coincidente con el calibre 6.35 mm.

Parámetro	Valor
Presión interior	206 bar
Volumen del depósito de gas	490 cc
Coeficiente de dilatación adiabática	1.4
Velocidad del sonido	345 m/s

Tabla 4. Parámetros asociados al depósito para carga máxima

Sustituyendo los valores de la tabla anterior en la fórmula de la solución isotérmica para flujo crítico, obtenemos la siguiente expresión analítica que modela la descarga del depósito de aire comprimido durante el disparo:

$$P_{salida} = 206 \cdot e^{-12.904 \cdot t}$$
 (8)

La siguiente gráfica representa el modelo analítico de la expansión del depósito de aire del Airforce Condor:



Figura 34. Modelo analítico de la expansión del depósito de aire comprimido del Airforce Condor.

De acuerdo con el funcionamiento de los rifles de aire pre comprimido en general, y del Airforce Condor en particular, el modelo de expansión que mejor simula el proceso de descarga real es el isotérmico.

La descarga del depósito de aire en las armas de PCP se produce de forma escalonada, liberando un pequeño volumen de gas en cada disparo en comparación con el volumen interior del depósito. De este modo, la temperatura del gas en el interior del depósito permanece constante durante el proceso de descarga debido a que hay suficiente tiempo para la transmisión de calor.

Este razonamiento podría cuestionarse para modelos de PCP semiautomáticos donde es posible efectuar una serie de disparos consecutivos en un relativamente corto intervalo de tiempo, pero en el caso de rifles monotiro como el Airforce Condor, la suposición de expansión isotérmica resulta evidente.

Cabe hacer referencia que, el tiempo de apertura y cierre de la válvula dependerá no solo del muelle interno de la misma, sino también de la rigidez del muelle disparador que impulsa el martillo y de la presión interna del depósito en el momento de efectuar el disparo.

### 4.3. Modelo numérico de la descarga del depósito de aire comprimido

Se procede a continuación a la construcción de un modelo numérico para simular la descarga del depósito de aire comprimido del Airforce Condor. Este modelo se lleva a cabo fundamentalmente en dos fases: una primera, en la cual se procede a la elaborar una representación CAD simplificada del depósito de 490 centímetros cúbicos del Airforce Condor; y una segunda, en la cual se lleva a cabo la simulación de la expansión no lineal del aire con una presión inicial de 206 bares través del conducto de salida.

El diseño del depósito se lleva a cabo usando la interfaz Design Modeler dentro de Ansys Workbench 14.5, mientras que el modelado de la expansión del aire se desarrolla usando Ansys Autodyn.

Ansys Autodyn consiste en una herramienta de análisis explícito para el modelado no lineal de sólidos, fluidos, gases, y la interacción entre ellos. Los métodos implícitos y explícitos son aproximaciones empleadas en el análisis numérico para obtener soluciones ordinarias en función del tiempo y ecuaciones diferenciales parciales. Los métodos explícitos calculan el estado de un sistema en un momento posterior desde el estado en el momento actual, mientras que los métodos implícitos encuentran una solución mediante la resolución de una ecuación que implica tanto el estado actual del sistema y como el posterior.

#### 4.3.1. Construcción del depósito de aire comprimido

El primer paso tras iniciar un proyecto de dinámica explícita, es cargar los materiales que en nuestro caso los obtendremos directamente de la librería de Ansys. El depósito del Airforce Condor se halla fabricado en acero inoxidable, por lo que cargamos dicho material dentro de la librería de materiales explícitos.

<b>RIGID-STNL.STEEL</b>		
Equation of State	Rigid	
Reference density	7.86000E+00 (g/cm3)	
Constrain Rigid Body	No	
Rigid Body Type	Multi-body	
Strength	None	
Failure	None	
Erosion	None	
Material Cutoffs	-	
Maximum Expansión	1.00000E-01 (none)	
Minimum Density Factor	1.00000E-04 (none)	
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)	
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)	
Minimum Soundspeed	1.00000E-06 (m/s)	
Maximum Soundspeed (SPH)	1.01000E+20 (m/s )	
Maximum Temperature	1.01000E+20 (K )	

Tabla 5. Parámetros empleados para el modelado del acero

A continuación, procedemos a ejecutar el CAD de dicho depósito, generando un cuerpo de revolución de geometría simplificada con el objeto de reducir el esfuerzo computacional.



Figura 35. Modelo simplificado del depósito de aire comprimido del Airforce Condor

El siguiente paso será realizar un mallado sobre este cuerpo de forma que lo podamos exportar a la herramienta Autodyn, y realizar la simulación de la expansión del aire.

### 4.3.2. Simulación de la descarga del depósito de aire comprimido

En esta fase, importaremos en Autodyn el modelo del depósito desarrollado anteriormente como un cuerpo lagrangiano. A continuación, cargaremos dos veces el aire desde la librería de Autodyn, uno para simular el aire atmosférico a la salida del depósito, y el otro para modelar el aire comprimido que se halla en el interior del mismo.

Equation of State	Ideal Gas
Reference density	1.22500E-03 (g/cm3)
Gamma	1.40000E+00 (none )
Adiabatic constant	0.00000E+00 (none)
Pressure shift	0.00000E+00 (kPa )
Reference Temperature	2.88200E+02 (K)
Specific Heat	7.17600E+02 (J/kgK)
Thermal Conductivity	0.00000E+00 (J/mKs )
Strength	None
Failure	None
Erosion	None
Material Cutoffs	-
Maximum Expansión	1.00000E-01 (none)
Minimum Density Factor	1.00000E-04 (none)
Minimum Density Factor (SPH)	2.00000E-01 (none)
Maximum Density Factor (SPH)	3.00000E+00 (none)
Minimum Soundspeed	1.00000E-02 (m/s)
Maximum Soundspeed (SPH)	1.01000E+20 (m/s )
Maximum Temperature	1.01000E+20 (K)

Tabla 6. Parámetros empleados para el modelado del aire

El siguiente paso será crear un espacio euleriano lleno con aire atmosférico, en el interior del cual situaremos el depósito de aire comprimido. Dado que el objetivo de este modelo numérico es la medición de los parámetros del aire a la salida del depósito, adoptamos un mallado relativamente grueso para el espacio euleriano (mesh size = 1 mm).

A continuación, llenaremos el interior del depósito con aire, el cual inicializaremos a una presión total de 207.013 bares. La siguiente figura muestra la configuración de este modelo numérico con la localización de los materiales y el mallado de las partes.



Figura 36. Configuración del modelo numérico del depósito de aire comprimido del Airforce Condor en Autodyn.

Una vez definidas las interacciones entre las partes langrangianas (depósito) y las partes eulerianas (aire atmosférico y aire comprimido), podemos proceder a la ejecución del modelo. Las siguientes figuras muestran diferentes ciclos durante la ejecución del modelo.



Figura 37. Ejecución del modelo numérico del depósito de aire comprimido del Airforce Condor en Autodyn. Ciclo 160



Figura 38. Ejecución del modelo numérico del depósito de aire comprimido del Airforce Condor en Autodyn. Ciclo 460



Figura 39. Ejecución del modelo numérico del depósito de aire comprimido del Airforce Condor en Autodyn. Ciclo 620

#### 4.3.3. Resultados del modelo numérico de la descarga del depósito

Una vez finalizada la simulación, Autodyn nos proporciona la lectura de la presión relativa en función del tiempo a la salida del depósito. La siguiente gráfica es el resultado de la variación de esta presión de acuerdo con el modelo numérico.



### Gauge History (Ident 0 - admodel)

Figura 40. Modelo numérico de la expansión del depósito de aire comprimido del Airforce Condor.

Observando los resultados obtenidos en el modelo numérico, podemos observar que los resultados mostrados son la gráfica para el manómetro teórico situado a la salida del depósito, por lo tanto, la lectura de presión comienza con cierto desfase temporal que representa el tiempo que tarda en viajar el gas a través del conducto hasta que alcanza la salida.

#### 4.3.4. Comparación entre los modelos analítico y numérico

Por último, llevaremos a cabo una comparación entre este modelo numérico de la descarga del depósito y el modelo analítico implementado en la sección 4.2. Aunque la correcta validación de dichas predicciones debería llevarse a cabo por medios experimentales, procuraremos establecer una comparativa entre ambos modelos, determinando el error porcentual que incorpora la simulación numérica frente a la predicción analítica para unos determinados instantes de tiempo. La definición para el error de aproximación porcentual es la siguiente:
$$\delta = \left| \frac{p_{te\acute{o}rica} - p_{autodyn}}{p_{te\acute{o}rica}} \right| \times 100 \tag{9}$$

A continuación, seleccionamos cuatro instantes de tiempo partiendo desde el principio de la descarga. El motivo de que no estemos interesados en el proceso completo de expansión es debido a que el tiempo de apertura de la válvula durante el disparo es muy breve. Si deseáramos predecir la presión en otro punto de operación, deberíamos volver a llevar a cabo la simulación en Autodyn, pero esta vez cambiando el valor de la presión inicial en el depósito por el deseado.

Por último, procedemos al cálculo del error de aproximación porcentual para los cincos instantes de tiempo mostrados en la gráfica anterior. Debemos también tener en cuenta el instante en el que comienzan las mediciones en el manómetro teórico en Autodyn, ya que el gas tarda un determinado tiempo en alcanzar la salida del depósito. Dichos valores queda recogidos en la siguiente tabla:

	Expan. Isotérmica	Autodyn	Error %
t = 10 ms	181.06 bar	180.25 bar	0.44%
t = 20 ms	159.14 bar	160.00 bar	0.54 %
t = 30 ms	139.88 bar	138.07 bar	1.29 %
t = 40 ms	122.94 bar	120.94 bar	1.62 %

Tabla 7. Estimación del error de aproximación para ambos modelos.

Cabe destacar la similitud entre las expansiones estimadas por los modelos analítico y numérico, con errores de aproximación inferiores al 2%. Como se puede ver reflejado en la tabla anterior no estamos interesados en la predicción de la expansión completa, solo los instantes iniciales que simulan el disparo del arma. Por esta razón, podemos determinar que la solución analítica isotérmica determinada anteriormente para flujo estrangulado o crítico se ajusta con bastante precisión a la expansión de nuestro depósito. Finalmente, cabe recordar que dado que el orificio de salida se hallará estrangulado durante la mayor parte del proceso de descarga, la velocidad del flujo de gas será la velocidad del sonido a la temperatura dada.

# 5. Balística

El término balística procede del griego *ba'llein* que significa "lanzar", y se entiende por el estudio físico-químico de todo lo relativo al movimiento de los proyectiles tales como balas, bombas de gravedad, cohetes, misiles balísticos, etc [WIKI11].

El estudio de la balística se centra en el análisis de las fuerzas, trayectorias, rotaciones y comportamientos diversos de los proyectiles en diferentes ambientes de empleo, además de la forma del proyectil, sustancias, temperaturas, presiones gaseosas, etc; además de las situaciones que suceden en las diferentes fases del disparo, desplazamiento del proyectil a lo largo del ánima y salida al exterior, trayectoria e impacto. La balística puede considerarse dividida en tres ramas:

- *Balística interna*: es aquella que estudia el movimiento del proyectil en el interior del ánima del cañón del arma desde que empieza su desplazamiento y hasta que abandona el mismo. Es decir, estudia todos los fenómenos que impulsan al proyectil, así como el quemado del propelente en el caso de las armas de fuego, la presión gaseosa, el giro y rozamiento dentro del ánima, etc.
- *Balística externa*: Estudia las trayectorias y los efectos perturbadores del medio ambiente sobre el proyectil. Es el análisis de lo que ocurre con el proyectil desde que abandona la boca del cañón hasta que hace blanco, o bien agota su impulso y cae.
- *Balística terminal*: Estudia los efectos causados por el choque del proyectil contra un cuerpo dado o ya definido.

## 5.1. Balística interna

El análisis de la balística interna de un arma puede llevarse a cabo de dos formas distintas según se considere una expansión del gas adiabática o isotérmica. Dado que este documento se centra en el estudio de las armas de aire pre-comprimido, durante el siguiente análisis se supondrá el empleo de aire como fluido de trabajo, cuya temperatura permanece prácticamente constante durante la fase de expansión. Esta suposición podría desembocar en resultados más imprecisos si el fluido de trabajo fuera otro tipo de gas, como por ejemplo CO2.

El empleo de CO2 tiene como principal desventaja que la precisión y velocidad del tiro depende en gran medida de la temperatura ambiente en que se realice el disparo debido a las propiedades físicas del gas. En ambientes más cálidos, la presión y velocidad son más altas que en ambientes fríos. Además, en las armas de dióxido de carbono, al efectuarse el disparo la temperatura del gas desciende bruscamente disminuyendo por tanto la presión y la velocidad, por ello se recomienda hacer intervalos entre disparos para que el arma recupere temperatura.

# 5.1.1. Modelo analítico del comportamiento del proyectil en el interior del cañón

La válvula de disparo libera una cierta cantidad de gas comprimido cuya presión propulsa al proyectil a lo largo del cañón. Durante el recorrido del proyectil en el interior del cañón podemos despreciar los efectos relativos a la resistencia aerodinámica, sin embargo, debemos tener en cuenta la disipación de energía producida por el rozamiento entre el cuerpo del proyectil y el ánima del cañón. Esta fuerza de rozamiento se asumirá constante durante todo el proceso de disparo, lo que implica que no dependerá de la velocidad del proyectil [DENN11]. Por otro lado, durante este análisis teórico, se supondrá un sellado perfecto entre el proyectil y el ánima del cañón, así como despreciables las energías consumidas durante el giro rotatorio del proyectil y en el proceso de aceleración del gas.

Estas simplificaciones nos permitirán a continuación derivar una expresión analítica para determinar la velocidad de salida del proyectil en función de los parámetros del arma.



Figura 41. Representación esquemática de un arma de gas comprimido.

En la Figura 41 podemos observar un depósito de gas comprimido con un volumen y presiones iniciales  $V_o$  y  $P_o$ . Cuando se acciona el mecanismo disparador, el gas expande en el interior del cañón de área transversal A y longitud L, impulsando al proyectil de masa m a lo largo del mismo. Como se ha mencionado anteriormente, suponemos que la temperatura del gas no cambia apreciablemente durante esta fase de expansión (expansión isotérmica), por lo que procedemos a aplicar la ley de Boyle para los gases:

$$P(t)V(t) = P_o V_o \tag{10}$$

Donde P(t) y V(t) representan la presión y el volumen del gas después de un cierto tiempo t. De este modo, las condiciones iniciales quedan como:

$$P(0) = P_o$$
$$V(0) = V_o$$

A continuación, de acuerdo con la Figura 41, podemos representar el volumen del gas como:

$$V(t) = V_o + Ax(t) \tag{11}$$

Donde A es el área transversal del cañón y x(t) representa la posición del proyectil dentro del cañón en función del tiempo.

$$\begin{aligned} x(0) &= 0\\ 0 &\le x \le L \end{aligned}$$

Considerando estas expresiones y aplicando la segunda ley de Newton, podemos obtener la ecuación de la fuerza en función del tiempo que actúa sobre el proyectil como:

$$F = P(t)A = \frac{AP_oV_o}{V_o + Ax(t)} - f = ma$$
(12)

Donde *f* representa la fuerza de rozamiento constante entre el proyectil y el cañon durante el movimiento, y *a* representa la aceleración del proyectil. Considerando la expresión de la aceleración en función de la velocidad a = vdv/dx, podemos integrar la expresión de la fuerza obteniendo la ecuación de la energía de este fenómeno:

$$\underbrace{\frac{1}{2}mv^{2}(x)}_{\text{Ec}} = \underbrace{P_{o}V_{o}Ln\left(1+\frac{Ax}{V_{o}}\right)}_{\text{W}} - fx$$
(13)

Donde v(x) representa la velocidad del proyectil en función de su posición en el interior del cañón. En esta ecuación queda reflejado que la energía cinética del proyectil es la diferencia entre la energía liberada por la expansión del gas menos la energía disipada por la fricción entre proyectil y cañón.

Finalmente, despejando la velocidad de esta ecuación energética y aplicando la condición de contorno de x=L, podemos obtener una expresión analítica de la velocidad de salida del proyectil en función de los diferentes parámetros del arma:

$$V_{salida} = \sqrt{\frac{2}{m} \left[ P_o V_o Ln \left( 1 + \frac{AL}{V_o} \right) - fL \right]}$$
(14)

Donde,

 $V_{salida} \equiv$  Velocidad de salida del proyectil (m/s).  $m \equiv$  Masa del proyectil (kg).  $P_o \equiv$  Presion inicial del gas (Pa).  $V_o \equiv$  Volumen inicial del gas (m3).  $A \equiv$  Área transversal del cañón (m2).  $L \equiv$  Longitud del cañón (m).  $f \equiv$  Fuerza de rozamiento proyectil-cañón (N).

De esta expresión de la velocidad se desprende que a mayor longitud de cañón, mayor es la velocidad de salida del proyectil, sin embargo, también es mayor el tiempo de actuación de la fuerza de rozamiento entre proyectil y cañón. Por esta razón, la máxima velocidad de salida del proyectil en cada arma se producirá para una longitud de cañón máxima que puede ser determinada resolviendo el correspondiente problema de optimización.

De este modo, la longitud de cañón que producirá velocidad máxima de salida del proyectil viene determinada por:

$$L_{max} = \frac{P_o V_o}{f} - \frac{V_o}{A} \tag{15}$$

Donde,

 $L_{max} \equiv$  Longitud máxima del cañón (m).  $P_o \equiv$  Presion inicial del gas (Pa).  $V_o \equiv$  Volumen inicial del gas (m3).  $A \equiv$  Area transversal del cañon (m2).  $f \equiv$  Fuerza de rozamiento proyectil-cañon (N).

Esta ecuación de diseño debe cumplirse siempre para un correcto diseño del arma que proporcione máximas velocidades de salida del proyectil. La siguiente gráfica representa longitud de cañón frente a coeficiente de fricción adimensional para los diferentes calibres disponibles del Airforce Condor. El coeficiente de fricción adimensional se obtiene dividiendo la fuerza de rozamiento entre la fuerza inicial que soporta el proyectil  $(f/P_0A)$ .



Figura 42. Longitud del cañón frente a coeficiente de fricción adimensional para una optima velocidad de salida del proyectil

A la hora de estimar analíticamente la velocidad de salida del proyectil, el único parámetro que necesitamos estimar es el valor del coeficiente de coeficiente de fricción dado que el resto de parámetros son conocidos (especificaciones técnicas del rifle).

A continuación, nos centraremos en el estudio del Airforce Condor del calibre 6.35 mm dado que disponemos de la información experimental necesaria para la validación de los resultados de los resultados analíticos que serán expuestos a continuación.

De acuerdo con la Figura 42 y considerando una longitud del cañón de 610 mm para el Airforce Condor del calibre 6.35 mm, el valor del coeficiente de fricción adimensional es 0.73. De ahora en adelante, para estimar la velocidad de salida del proyectil asumiremos este valor del coeficiente de fricción. Este valor es el óptimo que

proporciona máxima velocidad de salida para este modelo de Airforce Condor de acuerdo con la exposición analítica anterior y se asumirá que es el valor real del ánima del rifle.

Los valores de velocidad determinados a continuación de forma analítica nos permitirán determinar si el cañón Lothar Walter del Airforce Condor presenta un diseño óptimo de acuerdo con las especificaciones del este rifle de aire pre comprimido.



Figura 43. Coeficiente de fricción adimensional para el Airforce Condor cal. 6.35 mm

A continuación, representamos la expresión de la velocidad de salida del proyectil en función de los parámetros del Airforce Condor del calibre 6.35 mm. El proyectil elegido en este caso será el H&N Baracuda de 2.01 gramos de peso el cual será experimentalmente validado en un test de descarga del depósito. La siguiente tabla representa aquellos parámetros que permanecen constantes para esta estimación analítica:

Parámetro	Valor
Longitud del cañón	610 mm
Volumen del depósito de gas	490 cc
Calibre	6.35 mm
Masa del proyectil	2.01 g
Coeficiente de fricción adimensional	0.73

Tabla 8. Parámetros empleados para el modelado del depósito

La siguiente expresión analítica representa la velocidad de salida del proyectil en función de la presión interior en el depósito de gas comprimido, particularizada para el Airforce Condor del calibre 6.35 mm y el proyectil H&N Baracuda de 2.01 gramos.

$$v(P) = 22.08\sqrt{P} \tag{16}$$

Presión en el depósito (bar)	Velocidad de salida (m/s)
200	312.26
175	292.09
150	270.42
125	246.86
100	220.80
75	191.22
50	156.13

Tabla 9. Variación de la velocidad de salida del proyectil con la presión del depósito





Generalmente, para un diseño de depósito sin regulador como es el caso del Airforce Condor, se considera que admisibles caídas de velocidad de hasta el treinta por ciento. Este porcentaje se corresponde aproximadamente con 150 bares de presión interna en el depósito, por lo que para que un rifle de aire pre comprimido como el Airforce Condor, el rango de presiones de trabajo del depósito se sitúa entre los 150 y los 206 bares.

#### 5.1.2. Ensayos Experimentales

Para verificar la validez de los resultados analíticos expuestos previamente resulta necesario llevar a cabo una serie de pruebas en un Airforce Condor real. Para ello, se realizan dos tipos diferentes de exámenes o tests: test de velocidades frente a masas, y

test de descarga del depósito. Ambos test se basan en la medida de la velocidad de salida del proyectil en la boca del cañón, para lo cual se emplea un cronógrafo balístico.

El Cronógrafo Balístico es un instrumento electrónico que se encarga de medir con precisión la velocidad de cualquier tipo de proyectil [HOUS03]. De esta forma, es posible calcular la velocidad de salida de cada proyectil y por lo tanto cuánta energía cinética es capaz de desarrollar el rifle para cada tipo de munición y condiciones.



Figura 45. Partes elementales de un cronógrafo.

En general, un cronógrafo balístico tiene dos sensores fotodetectores ubicados en la parte delantera y trasera de la unidad principal. Están ubicados debajo de lentes ópticas localizadas en la parte interna del instrumento. Estas detectan el paso de un proyectil sobre ellos, específicamente se detecta el cambio súbito en la cantidad de luz.

Cuando el proyectil pasa sobre el primer fotodetector, activa un contador que comienza a contar el tiempo y el cual se detiene cuando el proyectil pasa por el segundo fotodetector. La computadora en el cronógrafo entonces calcula y convierte esta información en velocidad, y enseguida es mostrada al usuario en una pantalla frontal. Generalmente, para mejorar la detección, el instrumento se acompaña de pantallas difusoras que se usan en ambientes con luz solar de gran intensidad.

#### 5.1.1.1. Test de velocidades frente a masas

El test de velocidades frente a masas sirve para determinar el comportamiento real del rifle para proyectiles con diferentes masas. Para poder realizar un correcto análisis, estos proyectiles deberán presentar un mismo calibre y, a su vez, el rifle deberá presentar idéntica configuración de potencia y presión en el depósito para cada tipo de proyectil. Mediante este test se podrá determinar que proyectil proporciona el mejor rendimiento del rifle mediante el cálculo de la energía cinética del mismo. Esta energía cinética es

directamente proporcional a la masa y velocidad al cuadrado del proyectil y es medida a la salida del cañón. Mayores masas implican menores velocidades de salida y viceversa, por ello de vital importancia determinar los proyectiles que mejor se ajustan a las especificaciones de este rifle de aire pre-comprimido.

Este test consiste en el llenado del depósito hasta su máxima presión admisible de 206 bares y, a continuación, se procede a efectuar cinco disparos consecutivos midiendo las velocidades a la salida del cañón para cada tipo de proyectil.

La ejecución de este test se llevo a cabo para tres tipos de proyectiles de idéntico calibre y similar forma, pero diferente peso: el H&N Baracuda de 2.01 gramos, el JSB Exact King de 1.65 gramos, y el Beeman FTS de 1.30 gramos. Los tres son balines de plomo del calibre 6.35 mm y con nariz redonda.



Figura 46. H&N Baracuda de 2.01 gramos



Figura 47. JSB Exact King de 1.65 gramos



Figura 48. Beeman FTS de 1.30 gramos

Los resultados del cronometro balístico del test de velocidades frente a masas quedan reflejados en la siguiente tabla:

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
Masa	2.01 g	1.65 g	1.30 g
Disparo 1	314.25 m/s	335.28 m/s	349.91 m/s
Disparo 2	313.94 m/s	335.17 m/s	348.08 m/s
Disparo 3	312.42 m/s	336.49 m/s	347.77 m/s
Disparo 4	310.89 m/s	334.67 m/s	346.25 m/s
Disparo 5	309.37 m/s	335.88 m/s	346.12 m/s

Tabla 10. Resultados obtenidos durante el test de velocidades frente a masas

A continuación, procedemos a calcular la máxima energía cinética de cada proyectil a la salida del cañón usando la velocidad medida en el disparo 1 de cada tipo balín. La energía cinética debida a la rotación del proyectil se considera despreciable frente a la energía cinética debida al avance longitudinal.

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \tag{17}$$

Donde,

 $E_c \equiv$  Energia cinetica del proyectil (N).  $v \equiv$  Velocidad de salida del proyectil (m/s).  $m \equiv$  Masa del proyectil (kg).

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
Masa	2.01 g	1.65 g	1.30 g
$E_{c max}$	99.25 J	92.74 J	79.58 J

Tabla 11. Valores máximos de energía cinética para cada proyectil

Podemos comprobar cómo la máxima energía de salida se alcanza para el H&N Baracuda de 2.01 gramos. Esto se debe a que, aún presentando un mayor peso, su diseño le permite absorber mejor la energía procedente del gas comprimido y desarrollar elevadas velocidades en el interior del cañón.

#### 5.1.1.2. Test de descarga del depósito

El test de descarga del depósito sirve para determinar el comportamiento real del rifle para una determinada potencia en el selector y para un determinado proyectil, estableciendo cuantos disparos efectivos se pueden llevar a cabo dentro de un rango admisible de velocidades. Este test es especialmente recomendable en armas que no presentan un regulador de presión instalado, como es el caso del Airforce Condor de serie.

Este test consiste en el llenado del depósito hasta su máxima presión admisible y, a continuación, procediendo a efectuar una serie de disparos consecutivos midiendo las velocidades a la salida del cañón. La medida de velocidad se suele realizar utilizando un cronógrafo balístico.

Durante este examen de descarga, se procedió a llenar el depósito de aire comprimido hasta la presión máxima admisible de 206 bares y, a continuación, se procedió a efectuar 34 disparos consecutivos y a medir las velocidades a la salida del cañón. Finalmente, se procedió a conectar un manómetro al depósito registrando una presión de 140 bares. Durante este test, se utilizo un proyectil H&N Baracuda del calibre 6.35 mm y con 2.01 gramos de peso debido a su alto rendimiento determinado en el test de velocidades frente a masas.

Disparo	Velocidad (m/s)	Disparo	Velocidad (m/s)
1	307,24	18	302,66
2	313,03	19	299,31
3	314,25	20	295,04
4	316,38	21	293,52
5	315,77	22	294,43
6	316,99	23	292,6
7	316,27	24	287,42
8	310,28	25	284,68
9	315,16	26	285,59
10	313,94	27	283,76
11	311,5	28	282,85
12	310,89	29	281,63
13	307,54	30	281,94
14	308,76	31	281,33
15	306,32	32	277,97
16	303,88	33	277,12
17	305,41	34	273,71

Tabla 12. Valores de velocidad durante el test de descarga del depósito



Figura 49. Velocidad de salida del H&N Baracuda durante el test de descarga del deposito

En la Figura 49, podemos observar la ausencia del regulador en el diseño del Airforce Condor. En este tipo de diseños, al tiempo que la presión en el depósito de aire disminuye, el tiempo de apertura de la válvula se incrementa debido a la menor resistencia que ofrece el aire comprimido en el interior del depósito sobre la válvula. Por lo tanto, cuanto mayor es el tiempo de apertura de la válvula, mayor es la cantidad de aire a menor presión que pasa al puerto de transferencia. De este modo, el resultado en un rifle como el Airforce Condor sin regulador instalado, es un pico en la velocidad de salida del proyectil (conocido como "sweet spot" o "punto dulce") antes de que esta comience a disminuir en los posteriores disparos.

#### 5.1.3. Validación de los resultados analíticos

Empleando el test de descarga del depósito podemos observar como disminuye la velocidad a medida que se efectúan una serie de disparos y, por tanto, a medida que disminuye la presión en el depósito de aire comprimido. Aunque carecemos documentación de los valores de presión después de cada disparo, podemos realizar una comparación entre ambas curvas de velocidad de salida del proyectil, y establecer el nivel de precisión de la formulación analítica desarrollada en apartados anteriores en comparación con las pruebas reales.

De cara a poder comparar resultados analíticos y experimentales, representamos la ecuación analítica calculada anteriormente para la determinación de salida en función de la presión sabiendo que:

- i. El disparo numero 1 corresponde con una presión de 206 bares.
- ii. El disparo numero 34 corresponde con una presión de 140 bares.

De este modo, aplicando estas dos lecturas del manómetro como condiciones de contorno, procedemos a representar la siguiente ecuación de nuevo:

$$v_{salida} = 22.08\sqrt{P} \tag{18}$$

Donde,

 $v_{salida} \equiv$  Velocidad de salida del proyectil (m/s).  $P \equiv$  Presión inicial del gas (bar).

Esta expresión analítica fue estimada previamente considerando un proyectil del calibre 6.35 mm y con una masa de 2.01 gramos, y la cual se corresponde con el H&N Baracuda empleado en el test de descarga del depósito.

A continuación, procedemos a representar la curva obtenida mediante la ecuación (18) y establecemos su relación con la colección de velocidades obtenida mediante el test de descarga mediante el coeficiente de determinación  $R^2$ . Este coeficiente establece la calidad del modelo analítico estimado para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse mediante dicho modelo.



Figura 50. Valores de velocidad del proyectil durante el test de descarga y ecuación analítica estimada

El coeficiente de determinación de la expresión analítica respecto a los resultados experimentales contenidos mediante el test de descarga del depósito es del 95.44%. Por lo que, usando la ecuación deducida, podemos llevar a cabo predicciones analíticas de la velocidad de salida del proyectil y de los correspondientes valores de presión en el depósito asumiendo un **error aproximado del 4.56%.** 

#### 5.1.2. Rendimiento del rifle de aire pre comprimido

La eficiencia o rendimiento de un arma de gas comprimido viene determinada por el cociente entre la energía del proyectil dividido por la energía del gas a la salida del cañón. Asumiendo las diferentes suposiciones planteadas previamente, la única disipación de energía no despreciable viene causada por el rozamiento entre el proyectil y el cañón. De este modo, la ecuación del rendimiento queda planteada de la siguiente manera:

$$\varepsilon = \frac{E_c}{W} = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{P_o V_o Ln\left(1 + \frac{AL}{V_o}\right)}$$
(19)

Donde,

 $\varepsilon \equiv$  Rendimiento del arma de aire comprimido.  $E_c \equiv$  Energía cinética del proyectil a la salida del cañón (J).  $W \equiv$  Energía del gas a la salida del cañón (J).  $v \equiv$  Velocidad de salida del proyectil (m/s).  $m \equiv$  Masa del proyectil (kg).  $P_o \equiv$  Presion inicial del gas (Pa).  $V_o \equiv$  Volumen inicial del gas (m3).  $A \equiv$  Area transversal del cañon (m2).  $L \equiv$  Longitud del cañon (m).

Considerando de nuevo las características técnicas del Airforce Condor del calibre 6.35 mm, procedemos a evaluar el rendimiento del arma para los tres tipos de proyectiles analizados previamente: el H&N Baracuda de 2.01 gramos, el JSB Exact King de 1.65 gramos, y el Beeman FTS de 1.30 gramos. A su vez, este rendimiento lo calcularemos considerando la velocidad medida en el primer disparo durante el test de velocidades frente a masas expuesto anteriormente.

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
Masa	2.01 g	1.65 g	1.30 g
$E_{c max}$	99.25 J	92.74 J	79.58 J
W	390.32 J	390.32 J	390.32 J
3	25.43 %	23.76 %	20.39 %

Tabla 13. Rendimiento del Airforce Condor para cada proyectil

Como podemos observar en la tabla anterior, la mayor parte de la energía de gas queda disipada en el interior del cañón. Pero, ¿por qué resulta tan ineficiente si la velocidad de salida del cañón ha sido optimizada? Cañones largos implican una mayor cantidad de energía disipada por el rozamiento, sin embargo, cañones cortos suponen un mayor desperdicio de la presión del gas.

Una vez que el proyectil abandona el cañón, la presión del gas restante se disipa en la atmósfera, de modo que la longitud de cañón óptima se obtiene mediante la compensación entre la fricción y la presión del gas perdida.

### 5.2. Balística externa

Una vez entendida como es llevada a cabo la transeferencia de energía al proyectil desde el aire comprimido almacenado en el depósito, es de vital importancia desarrollar un análisis sobre el vuelo del mismo de cara a optimizar el rendimiento en el uso de las armas de PCP en general, y del Airforce Condor, en particular.

La balística externa estudia las trayectorias y los efectos perturbadores del medio ambiente sobre el proyectil. Es el análisis de lo que ocurre con el proyectil desde que abandona la boca del cañón hasta que hace blanco, o bien agota su impulso y cae. Las armas de aire comprimido presentan una cantidad de retos en lo referente a su estudio y diseño, por lo que elegir el proyectil adecuado a cada una de ellas resulta de vital importancia por obtener un máximo rendimiento.

Antes de pasar al estudio detallado de la balística exterior, llevaremos a cabo una descripción detallada de la anatomía de los proyectiles empleados en las armas de aire comprimido, justificando las diferencias entre estos y los proyectiles empleados en las armas de fuego.

#### 5.2.1. Proyectiles

Determinar el proyectil adecuado para un arma de aire comprimido es una decisión que generalmente requiere el estudio previo de la propia arma. Generalmente, los tiradores se centran únicamente en tomar decisiones sobre el calibre o la potencia que desean obtener de sus armas, sin prestar atención al peso o forma del proyectil que mejor se adecua a su rifle. En este apartado, se analizarán las cuatro variables de las que dependen los balines empleados en las armas de aire comprimido: anatomía, material, peso, y calibre.

#### 5.2.1.1. Anatomía del proyectil

Los balines más extendidos son los conocidos como "Diábolos" debido a su mayor eficiencia a la hora de absorber la energía del gas que los impulsa [CHAP09]. Estos proyectiles son generalmente de plomo y presentan una constricción en la cintura con el

fin de reducir la fricción entre el proyectil y el cañón, así como crear una delgada falda en la parte posterior del balín. Esta falda, la cual se haya hueca por dentro, se expande por el efecto del gas formando un sellado entre el proyectil y el cañón y facilitando el acoplado al estriado del ánima. El grosor de las paredes de la falda es un factor importante a considerar dependiendo de la potencia del arma, ya que faldas de gran espesor pueden no expandir lo suficiente. Por otro lado,



algunos proyectiles presentan un rayado en estas faldas para facilitar el proceso de expansión y acoplado al ánima, sin embargo, estos rayados suelen tener una influencia negativa en la aerodinámica del proyectil como se verá en secciones posteriores.

Otro factor a considerar en el ánalsis de la eficiencia balística es la altura a la que se encuenta la constricción o cintura del balín. Usualmente, la cintura del proyectil suele estar en el punto medio del mismo ya que cabezas o faldas de corta longitud dan lugar a aristas afiladas en la forma del proyectil que provocan mayores turbulencias en el fluido por el cual viajan (generalmente aire) y, consecuentemente, mayor resistencia aerodinámica.

Por lo general, los proyectiles se clasifican según la forma de la cabeza, dado que es el factor de mayor importancia en términos de alcance y penetración. Dependiendo de si el balín esta pensado para caza o tiro deportivo, pueden interesar un mayor alcance o un mayor efecto destructivo en el objetivo. A continuación, la siguiente imagen muestra los tipos de balines comerciales más comúnes:



Figura 51. Balín de tipo esférico: presentan baja eficiencia aerodinámica. Se emplean fundamentalmente para disparos a cortas distancias con armas de baja potencia.



Figura 52. Balín de tipo wadcutter: presentan una cara frontal totalmente plana, poco eficiente aerodinámicamente y con baja capacidad de penetración.



Figura 53. Balín de tipo Hollow Point, o de punta hueca: tienen un bajo rendimiento aerodinámico pero su punta hueca facilita su expansión en el momento del impacto.



Figura 54. Balín de tipo spitz truncado en punta de flecha: son un diseño que presenta una mayor penetración en el aire que los de punta hueca normal y a su vez llevan a cabo una gran expansión en el momento del impacto. El principal inconveniente es el escalón pronunciado en su unión al cuerpo del balín que resta eficacia por las turbulencias que genera.



Figura 55. Balín de tipo spitz: son un diseño cuyo objetivo es proporcionar maxima penetración pero producen muchas turbulencias detrás de su punta durante el vuelo.



Figura 56. Balín de tipo domed: tienen una cabeza semiesférica sin zonas de ruptura con el cuerpo principal por lo que presentan un alto rendimiento balístico.



Figura 57. Balín de tipo super domed: tienen una cabeza esférica en ángulo muy pronunciado, sin líneas de ruptura y conexión poco pronunciada con el cuerpo prinicipal lo que hace que presenten el mejor rendimiento balístico dentro de los balines tipo diábolo.

#### 5.2.1.1.1. Balas frente a balines

Después de analizar los diferentes tipos de proyectiles disponibles para las armas de gas comprimido, podemos observar como la forma todos ellos difiere en gran medida con la forma de las balas convencionales. El principal motivo de esta diferencia en la anatomía del proyectil es debida a la gran diferencia de energía generada por los propelentes de las armas de fuego y los gases comprimidos como aire, nitrógeno o dióxido de carbono.

Debido a los relativamente bajos niveles de energía producidos por las armas de gas comprimido, los balines deben presentar un orificio interior que garantiza la máxima transferencia de energía dentro del cañon en detrimento de un mejor diseño aerodinámico. A su vez, el hecho de que las armas de aire comprimido generen bajas velocidades del proyectil (en comparación con las armas de fuego) hace que la mejora de la aerodinámica del balín pierda importancia de cara al diseño, ya que, como se analizará en secciones posteriores, la resistencia aerodinámica es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad. A medida que un proyectil se diseña para mayores velocidades de vuelo, mayor debe ser el énfasis puesto en su diseño aerodinámico.

#### 5.2.1.2. Material del proyectil

El material más extendido en la producción de balines así como balas corrientes es el plomo debido a las ventajas que presenta. El plomo es un metal de bajo precio, fácilmente maleable y de baja temperatura de fundición, lo cual lo hace ideal para la producción en masa de proyectiles. Sin embargo, la principal ventaja del plomo es su elevada densidad, 11,340 kilogramos por metro cúbico, lo que permite fabricar proyectiles de masas considerables y reducido tamaño.

La principal desventaja del plomo está en los niveles de contaminación que genera. En la actualidad, las controles llevados a cabo por las autoridades europeas contra el uso de munición de plomo, han hecho que los fabricantes de balines tengan que buscar alternativas en metales menos contaminantes como el estaño o las aleaciones de plomo. En la actualidad, todavía no se ha conseguido encontrar un material que proporcione el mismo rendimiento balístico que el plomo a un coste similar, pero se sigue investigando en este campo con el fin de reducir los niveles de contaminación, al tiempo que se satisfacen las necesidades de los tiradores.

#### 5.2.1.3. Peso del proyectil

Existen diferentes gamas de pesos comerciales para los balines destinados para las armas de gas comprimido. Tal y como fue presentado en apartados anteriores, dentro de este documento, la energía cinética de un proyectil es directamente proporcional a la masa del mismo, por lo que, a igualdad de velocidades entre dos balines, aquel con mayor masa presentará mayor energía. Sin embargo, a la hora de decidir el peso más adecuado de un proyectil, debemos considerar el trabajo que le supone a nuestro rifle acelerarlo. Proyectiles muy pesados pueden suponer muy bajas velocidades a la salida del cañon, y en consecuencia, bajos niveles de energía cinética. La elección del peso del proyectil pasa por determinar el balance masa-velocidad que optimice el rendimiento de nuestro rifle. Otro factor que se considerara más adelante, y el cual es el objeto de estudio en esta sección, es la energía del proyectil en el momento de impacto, y para la cual habrá que considerar también el uso que se le quiere dar al arma de gas comprimido.

#### 5.2.1.3. Calibre del proyectil

La elección del calibre es un factor que depende exclusivamente de las necesidades del tirador. Generalmente, el uso de calibres menores se centra en el tiro deportivo a largas distancias. Con calibre pequeños, como el 4.5 mm, se obtienen mayores alcances debido a las elevadas velocidades de salida y a la menor resistencia aerodinámica por un menor área transversal del proyectil.

Por otro lado, calibres como el 6.35 mm, ofrecen menores velocidades de salida del cañón pero un mayor poder de parada. El poder de parada se define como la capacidad que tiene la munición de entregar su energía al objetivo, es decir, la capacidad que tiene el balín de derribar el blanco. El poder de parada viene generalmente determinado por el calibre y la capacidad de penetración del proyectil, y es un parámetro de vital importancia cuando el arma va a estar destinada a la caza de animales.

#### 5.2.2. Análisis de la trayectoria del proyectil

Una vez finalizado el estudio de los diferentes tipos de proyectiles disponibles y de la influencia de sus diferentes características, nos introduciremos de lleno en el análisis aerodinámico de los balines a través del estudio de sus trayectorias.

Las dos fuerzas principales que actúan sobre el proyectil durante su vuelo son la fuerza de resistencia y la fuerza gravitatoria. La fuerza de resistencia es la fuerza aplicada por el medio a través del cual se encuentra viajando el proyectil, provocando una reducción en su velocidad de avance longitudinal; mientras que, por otro lado, la fuerza gravitatoria provocará la caída vertical del proyectil desviándolo de una trayectoria rectilínea. En balística avanzada, deberíamos considerar fuerzas adicionales como las provocadas por el efecto Magnus y el efecto coriolis terrestre, pero dentro del rango de velocidades del proyectil en el que se focaliza este proyecto, los efectos de dichas fuerzas pueden considerarse despreciables.



Figura 58. Diagrama de fuerzas de un balín durante su vuelo.

A continuación definiremos una serie de conceptos y fórmulas analíticas que representarán la base del estudio posterior:

**Energía del proyectil:** el proyectil presentara dos tipos de energías que serán gradualmente consumidas durante su vuelo y hasta que se produzca el impacto. Por un lado, el balín poseerá una cierta energía potencial la cual será consumida por el trabajo ejercido por la gravedad terrestre y que provocará la trayectoria curvilínea del proyectil. Por otro lado, el proyectil contará con una energía cinética de translación, debida a la componente longitudinal de su velocidad; y una energía cinética de rotación causada por el giro rotacional o spin del proyectil sobre su propio eje. La única energía realmente a considerar cuando el proyectil hace impacto, y la cual determinará los efectos del mismo, es la energía cinética de translación.

$$E_{proyectil} = E_{c trans} + E_{c rot} + E_{pot} \approx \frac{1}{2}mv^2$$
(20)

**Fuerza de resistencia**: en mecánica de fluidos, se conoce como fuerza de resistencia a aquella se opone al movimiento relativo de un objeto con respecto al fluido que lo rodea y, para flujo turbulento como es nuestro caso particular de estudio, presenta la siguiente expresión:

$$F_D = \frac{1}{2}\rho v^2 C_D A \tag{21}$$

Donde,

 $F_D \equiv$  Fuerza de resistencia (N).  $\rho \equiv$  Densidad del medio a través del que viaja el proyectil (kg/m3).  $v \equiv$  Velocidad del proyectil (m/s).  $C_D \equiv$  Coeficiente de resistencia (-).  $A \equiv$  Área transversal del proyectil (kg).

Por lo tanto, a mayor calibre y velocidad del proyectil, mayor será la fuerza de resistencia aplicada, en nuestro caso, por el aire. El otro parámetro del cual es dependiente esta fuerza de resistencia es el coeficiente de resistencia  $C_D$ , sin embargo, dicho coeficiente es variable en función del número de Reynolds y, para flujo compresible como el aire, del número de Mach.

**Coeficiente Balístico:** la necesidad de un valor numérico que cuantifique la eficiencia aerodinámica de un proyectil, y permita compararlo con los demás tipos de proyectiles independientemente de las distintas variables externas que influyen en el disparo, lleva a la definición del coeficiente balístico.

El coeficiente balístico de un cuerpo es una medida de la habilidad de dicho cuerpo para superar la resistencia del aire durante su vuelo [HOUS03]. De este modo, un coeficiente balístico alto significa una mayor eficiencia aerodinámica del objeto o, en este caso, del balín.

$$BC = \frac{SD}{i} \tag{22}$$

Donde,

 $BC \equiv$  Coeficiente balístico.  $SD \equiv$  Densidad seccional.  $i \equiv$  Factor de forma.

El coeficiente balístico es una medida que proporciona el fabricante debido la complejidad en su determinación. La densidad seccional es una variable que viene representada por el cociente de la masa del proyectil entre su área transversal. Pero, por otro lado, el factor de forma es el cociente entre coeficiente de resistencia de una bala estandar tipo G1 y el coeficiente de resistencia del proyectil deseado durante un determinado test de disparo.

Una vez entendidos estos conceptos, pasaremos al ánalisis de las trayectorias de los proyectiles usando el software balistico *Hawke ChairGun Pro*. Este software lleva a cabo una serie de cálculos analíticos con el fin de predecir la trayectoria, velocidad, punto de impacto y penetración de un determinado proyectil. Las ecuaciones diferenciales básicas de las cuales parte el ánalisis de la trayectoria de un proyectil considerando la resistencia del aire son las siguientes:

• Trayectoria horizontal:

$$\frac{\partial x}{\partial t} = v_x(t) \tag{23}$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = -\frac{F_D(v_x)}{m} \tag{24}$$

• Trayectoria vertical:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = v_y(t) \tag{25}$$

$$\frac{\partial v_y}{\partial x} = \pm \frac{F_D(v_y)}{m} - g \tag{26}$$

Donde, x representa la posición del proyectil,  $v_{x,y}$  la velocidad en los ejes x e y,  $F_D$  la fuerza de resistencia del aire, m la masa del proyectil, g la acceleración de la gravedad, y t el tiempo. Los signos positivo o negativo en la trayectoria vertical, se determinan en función de si el movimiento es de ascenso o descenso del proyectil.

Para nuestras predicciones, consideraremos los tres proyectiles del calibre 6.35 mm que fueron empleados en la seccion previa: el H&N Baracuda de 2.01 gramos, el JSB Exact King de 1.65 gramos, y el Beeman FTS de 1.30 gramos. Por otro lado, los valores de velocidad inicial empleados para cada balín serán el máximo de los recogidos durante el test de masas frente a velocidades.

La siguiente imagen muestra una descripción conceptual de la trayectoria de un proyectil con los diferentes parámetros que se pueden extraer de ella:



Figura 59. Diagrama explicativo de los distintos parámetros que influyen en una trayectoria balística

Los datos requeridos por el software balístico Hawke ChairGun Pro para poder predecir la trayectoria de cada proyectil son el calibre del proyectil, su peso, su coeficiente balístico, la velocidad de salida del cañon, y el ángulo de disparo. Por otro lado, también debemos considerar los parámetros que influyen en la densidad del aire tales como temperatura, presión y humedad relativa. Estos datos se encuentran recogidos en la siguiente tabla para los tres proyectiles deseados:

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
Calibre	6.35 mm	6.35 mm	6.35 mm
Masa	2.01 g	1.65 g	1.30 g
Velocidad de Salida	314.25 m/s	335.28 m/s	349.91 m/s
Coeficiente Balístico	0.042	0.036	0.012
Ángulo de Disparo	45°	45°	45°
Temperatura	20°C	20°C	20°C
Presión	1 atm	1 atm	1 atm
Humedad Relativa	50 %	50 %	50 %

Tabla 14. Parámetros requeridos para el cálculo de las trayectorias

Los valores de velocidad inicial empleados para cada balín serán el máximo de los recogidos durante el test de masas frente a velocidades. Por otro lado, se emplea un ángulo de 45° con el fin de obtener las trayectorias con máximo alcance posible. El coeficiente balístico se encuentra disponible para cada proyectil dentro de la librería del *Hawke ChairGun Pro*. Finalmente, modelamos el aire en condiciones normales de temperatura, presión y humedad relativa para los tres proyectiles.

La siguiente gráfica representa las trayectorias de los tres proyectiles estudiados de acuerdo con los parámetros descritos anteriormente: H&N Baracuda (rojo), el JSB Exact King (azul), y el Beeman FTS (verde). El eje horizontal representa la distancia en metros desde el punto de disparo, mientras que el eje vertical muestra el punto de impacto respecto de la línea de mira en centímetros.



Como podemos observar en la gráfica de los tres proyectiles, tras cruzar el primer cero en sus trayectorias, el principal factor que afecta a la disminución de velocidad del proyectil durante el vuelo es el coeficiente balístico (BC). El H&N Baracuda, aún presentando una mayor masa y menor velocidad inicial, alcanza el segundo cero mucho después que el Beeman FTS a igualdad de ángulo de disparo y condiciones de presión, temperatura y humedad. El análisis puramente cinemático de las trayectorias, sin considerar la resistencia del aire, daría un resultado totalmente opuesto al obtenido.

#### 5.2.3. Determinación de la variación de la velocidad del proyectil

Otro factor crítico a considerar en el estudio de la balística externa, es la variación de velocidad de translación del proyectil a lo largo de su vuelo. Calculando esta variación se puede determinar con cuanta energía el balín impactará el blanco dando paso al estudio de la balística terminal.

Tal y como se ha referido previamente, la variación de la velocidad del proyectil durante su vuelo es debida a la fuerza gravitatoria y a la fuerza de resistencia del aire. La gráfica anterior mostró como un coeficiente balístico superior proporciona una trayectoria más rectilínea que uno inferior lo que, al fin y al cabo, se traduce en una menor caída de velocidad. La siguiente fórmula representa la caída de velocidad de un objeto, en nuestro caso un balín, debida a la resistencia aplicada por el fluido a través del cual viaja [DESA94]:

$$V_{s} = V_{0} \cdot e^{-\left(\frac{A}{W_{f}}\right)\gamma_{0}c_{D}R}$$
(27)

Donde,

 $V_s \equiv$  Velocidad del proyectil a una distancia R del cañón (m/s).

 $V_0 \equiv$  Velocidad inicial del proyectil a la salida del cañón (m/s).

 $A \equiv$  Area transversal del proyectil (m2).

 $W_f \equiv$  Masa del proyectil (Kg).

 $\gamma_0 \equiv$  Peso especifico del aire (N/m3).

 $C_D \equiv \text{Coefficiente de resistencia (-).}$ 

 $R \equiv$  Distancia del proyectil desde la boca del cañón (m).

En la fórmula anterior se puede observar que los factores que definen la anatomía del proyectil a la hora de predecir su caída de velocidad son el área transversal, la cual vendrá determinada por el calibre; la masa del proyectil; y el coeficiente de resistencia, que será el responsable de determinar su mayor o menor eficiencia aerodinámica. Sin embargo, tal y como ha sido referido anteriormente, el coeficiente de resistencia es un parámetro no solo dependiente de la forma del proyectil, sino también de su número de Mach, por lo que éste irá variando durante el propio vuelo del proyectil. Esta información queda recogida en las siguientes gráficas para cada proyectil:



Figura 61. Coeficiente de resistencia del H&N Baracuda





En las gráficas anteriores del coeficiente de resistencia para cada uno de los tres proyectiles, la franja amarilla representa el rango de velocidades que presenta cada balín dentro de un alcance de 100 metros y el cual será mostrado en la siguiente gráfica.

La predicción analítica de la caída de velocidad para cada proyectil dentro de los 100 metros de alcance la realizamos de nuevo empleando el software balistico *Hawke ChairGun Pro*. Los datos introducidos para poder predecir esta caída de velocidad son el calibre del proyectil, su peso, su coeficiente balístico, la velocidad de salida del cañón, y el ángulo de disparo. *Hawke ChairGun Pro* es capaz de calcular la variación del coeficiente de resistencia Cd a partir de coeficiente balístico dado que posee en su base de datos los valores de factor de forma y densidad seccional que proporciona el fabricante. Por otro lado, también debemos considerar los párametros que influyen en el peso específico del aire tales como temperatura, presión y humedad relativa. Estos datos se encuentran recogidos en la siguiente tabla para los tres proyectiles deseados:

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
Calibre	6.35 mm	6.35 mm	6.35 mm
Masa	2.01 g	1.65 g	1.30 g
Velocidad de Salida	314.25 m/s	335.28 m/s	349.91 m/s
Coeficiente Balístico	0.042	0.036	0.012
Ángulo de Disparo	45°	45°	45°
Temperatura	20°C	20°C	20°C
Presión	1 atm	1 atm	1 atm
Humedad Relativa	50 %	50 %	50 %

Tabla 15. Parámetros requeridos para el cálculo de la caída de velocidad

Los valores de velocidad inicial empleados para cada balín serán el máximo de los recogidos durante el test de masas frente a velocidades. Las siguientes gráficas representan la caída de velocidad y energía cinética de los tres proyectiles estudiados de acuerdo con los parámetros descritos anteriormente: H&N Baracuda (rojo), el JSB Exact King (azul), y el Beeman FTS (verde).



- 83 -



Figura 65. Energía cinética del H&N Baracuda, JBS Exact King y Beeman FTS

Tal y como fue observado previamente en la gráfica de las trayectorias para los tres proyectiles, el Beeman FTS presenta una caída exponencial de mayor índice en su velocidad debido a un coeficiente balístico notablemente inferior al de los otros dos balines. Con objeto de establecer una comparativa de la eficiencia aerodinámica de los tres proyectiles, calcularemos la energía cinética a la salida del cañón y tras volar 100 metros en aire en condiciones normales. La siguiente tabla representa el tanto por ciento de energía cinética perdida por cada uno de los tres proyectiles durante un vuelo de 100 metros.

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
BC	0.042	0.036	0.012
E <sub>c inicial</sub>	99.25 J	92.74 J	79.58 J
$E_{c100m}$	47.63 J	37.62 J	6.10 J
$\Delta E_c \%$	52.01 %	59.43 %	92.33 %

Tabla 16. Energía cinética disipada durante el vuelo cada proyectil

Tras un vuelo de 100 metros, un proyectil como el Beeman FTS pierde prácticamente toda su energía cinética debido a la resistencia del aire, lo que revela que revela su baja eficiencia aerodinámica en comparación con proyectiles como H&N Baracuda o el JBS Exact King.

Todos los cálculos llevados a cabo en esta sección, desprecian la deriva lateral provocada por el efecto del viento durante el vuelo del proyectil debido a su influencia despreciable en la energía de impacto del proyectil. Por otro lado, toda la información presentada en esta sección se encuentra tabulada en el Anexo II para el rango de cero a cien metros en intervalos de cinco metros.

#### **5.3.** Balística terminal

La balística terminal se encarga del estudio del comportamiento de un proyectil cuando alcanza el objetivo. En esta sección llevaremos a cabo un análisis desde el punto de vista de la eficacia del Airforce Condor como arma de caza usando diferentes proyectiles.

#### 5.3.1. Análisis de la penetración

Existen diferentes modelos analíticos para la predicción de la penetración un proyectil en un determinado material, sin embargo, nosotros nos centraremos uno de los más extendidos y el que actualmente usa el software balístico *Hawke ChairGun Pro*. Este estudio parte de la base de la ecuación diferencial de Poncelet que representa la fuerza que actúa sobre el proyectil como la suma de dos fuerzas: una quasiestática y otra hidrodinámica. A continuación, para mejorar la compresión de la misma, llevaremos a cabo su deducción detallada:

Jean-Victor Poncelet postuló un modelo analítico simple para la estimación de la penetración llevada a cabo por un proyectil que impacta con una cierta velocidad contra un cuerpo. Este modelo parte de que la fuerza que actúa sobre el proyectil en el momento del impacto, es la suma de una fuerza hidrodinámica y otra quasiestática [SPAR07].

$$F_{frenado} = F_{hidrodinámica} + F_{quasiestática}$$
(28)

El modelo analítico de Poncelet sugiere que hay dos modos de acción de la fuerza total durante el frenado. Durante la primera parte del impacto, la principal componente actuando es la hidrodinámica hasta que, cuando el movimiento pasa a régimen laminar, es la componente quasiestática la de mayor relevancia. De este modo, la ecuación diferencial de Poncelet queda expresada de la siguiente forma:

$$\underbrace{\frac{\partial(mv)}{\partial t}}_{F_{fren}} = \underbrace{-\frac{1}{2}\rho v^2 C_D A}_{F_{hidrodin}} - \underbrace{\tau_{cort} A}_{F_{quasiest}}$$
(29)

Donde,

 $m \equiv$  Masa del proyectil (kg).  $\rho \equiv$  Densidad del objeto a través del cual viaja el proyectil (kg/m3).  $v \equiv$  Velocidad del proyectil (m/s).  $C_D \equiv$  Coeficiente de resistencia (-).  $A \equiv$  Área transversal del proyectil (m2).  $\tau_{cort} \equiv$  Tensión de cortadura del objeto (N/m2).  $t \equiv$  Tiempo (s).

Cabe destacar que esta ecuación diferencial lleva a cabo una serie de suposiciones teóricas que se ajustan mejor a los proyectiles de forma cónica que a los de punta hueca o expansiva. Estas suposiciones se basan en asumir constantes masa y forma del

proyectil durante la penetración del objeto. Por otro lado, en balística avanzada deben tenerse en cuenta posibles efectos de licuefacción del proyectil para velocidades superiores a los 1000 metros por segundo. Dichos efectos no son analizados dado el rango de velocidades del proyectil en el que se centra este proyecto.

Por último, dado que el objeto de estudio de este apartado es la estimación de la letalidad del Airforce Condor como arma de caza, procederemos a la estimación de la penetración en gel balístico de los tres proyectiles estudiados a lo largo de este documento.

El gel balístico es una solución de polvo de gelatina en agua que simula la densidad y viscosidad del tejido muscular humano y animal, y el cual se utiliza como un medio estandarizado para probar el rendimiento terminal de las armas de fuego y gas comprimido. Por otro lado, aunque el gel balístico no modela la completa estructura del cuerpo incluyendo la piel y los huesos, funciona bastante bien como una aproximación de tejido muscular proporcionando resultados similares para la mayoría de las pruebas de balísticas.



Figura 66. Ortoedro de gel balístico para la medición de la penetración de proyectiles.

La densidad del gel balístico puede ser variable ajustando las proporciones de agua pero generalmente es de 1.3 gramos por centímetro cubico. Por otro lado, el valor de la tensión de cortadura se sitúa en torno a los 4 megapascales.

A continuación, procedemos a la obtención de las gráficas de penetración frente a la distancia para un alcance de 100 metros empleando el H&N Baracuda de 2.01 gramos, el JSB Exact King de 1.65 gramos, y el Beeman FTS de 1.30 gramos.



Figura 67. Penetración del H&N Baracuda, JBS Exact King y Beeman FTS
En la gráfica anterior, podemos observar como la penetración en gel balístico llevada a cabo por cada uno de los tres proyectiles es directamente proporcional a la energía cinética de cada uno en el momento del impacto. De este modo, podemos establecer que, usando el rifle de aire pre-comprimido Airforce Condor, el proyectil H&N Baracuda presenta una mayor letalidad que los proyectiles JBS Exact King y Beeman FTS considerando igualdad de condiciones en el disparo.

#### 6. Determinación de las distancias de seguridad para el uso de un rifle de aire pre-comprimido

En esta última sección, procederemos a evaluar los riesgos inevitables asociados con el uso de las armas de PCP en general, y del Airforce Condor en particular. Cabe destacar que las hipótesis expuestas a continuación forman parte de un uso correcto del rifle, el cual puede desembocar en situaciones desafortunadas de riesgo para usuarios y población circundante durante el momento del disparo. El objetivo de este apartado será por tanto proporcionar una herramienta de cálculo sencilla que permita evitar dichas situaciones de riesgo mediante la determinación de unas distancias de seguridad.

A continuación, se analizarán dos casos de impacto accidental para los cuales se determinarán las distancias mínimas de seguridad: accidente por impacto directo y accidente por rebote o impacto ricochet.

Por otro lado, el criterio para establecer el riesgo asociado a un impacto por un determinado proyectil se hará de acuerdo al "*Manual for the Prediction of Blast and Fragment Loadings in Structures*" [DEEN81]. Este manual fue elaborado para el U.S. Department of Energy, en colaboración con el Southwest Research Institute y bajo contrato con la U.S. Army Engineer Division, con el fin de proporcionar una guía para el diseño de protecciones para personal civil y/o militar contra posibles ataques.

La gráfica 68 contiene la probabilidad de letalidad y heridas asociado con el impacto de un proyectil de una cierta masa a una determinada velocidad de acuerdo con los estudios realizados por Ahlers en 1969. El porcentaje situado al lado de cada curva indica la probabilidad de muerte o heridas ante cualquiera de las condiciones de impacto que se detallan en la gráfica.

De este modo, procederemos a determinar cuál es la velocidad límite de impacto contra una persona sin que se produzca riesgo de lesiones, y considerando cada uno de los tres proyectiles analizados durante este proyecto.

Nota: la gráfica 68 se halla en unidades imperiales por lo que las conversiones pertinentes a unidades métricas han sido llevadas a cabo durante el uso de la misma.



Figura 68. Probabilidad de letalidad y heridas debidas impacto de un proyectil

De acuerdo con la gráfica anterior, podemos determinar la velocidad límite de impacto para la cual no hay riesgo de daño para las personas. De este modo, establecemos las siguientes velocidades límite para los tres proyectiles analizados en este documento: el H&N Baracuda de 2.01 gramos, el JSB Exact King de 1.65 gramos, y el Beeman FTS de 1.30 gramos.

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
Calibre	6.35 mm	6.35 mm	6.35 mm
Masa	2.01 g	1.65 g	1.30 g
Velocidad Límite de Impacto	64.48 m/s	70.10 m/s	76.20 m/s

Tabla 17. Velocidades límite de impacto para cada proyectil

Una vez determinados estos valores de velocidad por debajo los cuales un impacto resultaría inofensivo, procedemos a establecer las distancias de seguridad para el uso del Airforce Condor considerando impacto directo e impacto ricochet.

#### 6.1. Distancia mínima de seguridad para impacto directo

En este apartado, se determinará la distancia a la cual un proyectil perdido fruto de un disparo fallado podría resultar peligroso a partir de las velocidades límite estimadas

previamente. Para dicha estimación, supondremos el peor escenario posible para el cual el alcance del arma es máximo. Dicha situación se produce durante los primeros disparos tras el llenado completo del depósito de aire comprimido (velocidades máximas de salida del proyectil) y empleando un ángulo de disparo de 45°. El siguiente diagrama representa un posible escenario de accidente por impacto indirecto.



Figura 69. Diagrama ilustrativo de un posible accidente por impacto directo

A continuación, procederemos a determinar para los tres proyectiles del calibre 6.35 mm empleados a lo largo de este documento, cuál será la distancia mínima a la cual podrá situarse la población circundante sin que se exista riesgo de daños por impacto de un proyectil. En este análisis, se consideran las máximas velocidades iniciales de salida estimadas durante el test de velocidades frente a masas, así como condiciones normales de temperatura, presión y humedad relativa:

Marca	Marca H&N Baracuda		Beeman FTS
Calibre	6.35 mm	6.35 mm	6.35 mm
Masa	2.01 g	1.65 g	1.30 g
Velocidad de Salida 314.25 m/s		335.28 m/s	349.91 m/s
Coeficiente Balístico	0.042	0.036	0.012
Ángulo de Disparo	45°	45°	45°
Temperatura	20°C	20°C	20°C
Presión	1 atm	1 atm	1 atm
Humedad Relativa	50 %	50 %	50 %

Tabla 18. Parámetros para el cálculo de la caída de velocidad de cada proyectil



Figura 70. Caída de velocidad del H&N Baracuda



Figura 71. Caída de velocidad del JBS Exact King



Figura 72. Caída de velocidad del Beeman FTS

Empleando la caída de velocidad estimada para cada proyectil por el software balístico *Hawke ChairGun Pro* y las velocidades límite de impacto sin causar daños en las personas, podemos determinar la distancia mínima requerida a la cual debe mantenerse la población circundante para evitar accidentes por impacto directo.

Marca	Distancia mínima de seguridad
H&N Baracuda	497.5 m
JSB Exact	408.2 m
Beeman FTS	119.1 m

Tabla 19. Distancias mínimas de seguridad para impacto directo

Proyectiles con mayor energía cinética inicial y mejor coeficiente balístico como el H&N Baracuda requieren una distancia de seguridad considerablemente mayor de cara a evitar accidentes por impacto directo. Airforce Airguns recomienda una distancia mínima de 470 metros en el manual de usuario del Airforce Condor.

#### 6.2. Distancia mínima de seguridad para impacto ricochet

En este apartado, se determinará la distancia a la cual un proyectil rebotado fruto de un impacto contra una superficie rígida o contra la propia diana podría resultar peligroso a partir de las velocidades límite estimadas previamente.

Si un proyectil impacta contra un objeto con un ángulo determinado puede producirse lo que se conoce como ricochet. El proceso ricochet consiste en lo siguiente: durante el impacto, el proyectil y el objetivo se hayan comprimidos elásticamente, de forma que cuando esta energía es liberada se produce un cambio en el movimiento del proyectil. De este modo, las deformaciones producidas por la fuerza resistiva del objeto impactado generarán una serie de fuerzas internas en el proyectil que provocarán unos momentos de rotación cambiando la dirección del mismo [CARL07].

En general, las placas de delgado grosor no producen ricochet salvo para grandes ángulos de ataque. La siguiente fórmula permite determinar analíticamente el mínimo ángulo de impacto del proyectil a partir del cual se producirá ricochet:

$$\tan^{3}(\beta) > \frac{2}{3} \frac{\rho_{p} v^{2}}{Y_{p}} \left(\frac{L^{2} + d^{2}}{Ld}\right) \left[1 + \left(\frac{\rho_{p}}{\rho_{t}}\right)^{\frac{1}{2}}\right]$$
(30)

Donde,

 $\beta \equiv \text{ Ångulo de impacto del proyectil (°).}$   $\rho_p \equiv \text{Densidad del proyectil (kg/m3).}$   $\rho_t \equiv \text{Densidad del objetivo (kg/m3).}$   $v \equiv \text{Velocidad de impacto del proyectil (m/s).}$   $Y_p \equiv \text{Límite elástico del proyectil (Pa).}$   $L \equiv \text{Longitud del proyectil (m).}$  $d \equiv \text{Diámetro del proyectil (m).}$  Tal y como refleja la fórmula anterior, el ángulo crítico que produce ricochet depende tanto del proyectil como del objeto impactado. Por lo tanto, con el fin de proporcionar una estimación numérica, procederemos a calcular el ángulo crítico para los tres proyectiles estudiados durante este documento asumiendo como objetivo una diana estándar de acero. Para aplicar la fórmula anterior, consideraremos los tres proyectiles como tres cilindros uniformes de plomo con idéntico calibre, densidad y limite elástico. Por lo tanto, el único factor a variar será su longitud y velocidad de impacto.



Figura 73. Diagrama ilustrativo del efecto ricochet

Nota: debido a la compleja forma de un balín tipo diábolo, se aproxima este por un cilindro macizo cuya longitud dependerá de la masa y densidad del mismo. Por otro lado, consideramos un tiro a una distancia de 25 metros del objetivo (diana más cercana en competición con este tipo de rifles) a partir de la cual determinamos la velocidad de impacto para cada proyectil.

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS	
d	6.35 mm	6.35 mm	6.35 mm	
L	5.6 mm	4.6 mm	3.62 mm	
$ ho_{plomo}$	$11.34 \text{ g/cm}^3$	$11.34 \text{ g/cm}^3$	$11.34 \text{ g/cm}^3$	
Y <sub>plomo</sub>	12 MPa	12 MPa	12 MPa	
$v_{impacto25m}$	279.7 m/s	286.9 m/s	233.5 m/s	
$\rho_{acero}$	$8.05 \text{ g/cm}^3$	$8.05 \text{ g/cm}^3$	$8.05 \text{ g/cm}^3$	
β	<b>80.55</b> °	<b>80.84</b> °	<b>79.86</b> °	

Tabla 20. Ángulo mínimo de impacto que produce ricochet para cada proyectil

Una vez determinado el ángulo mínimo que produce ricochet, procedemos al cálculo de la velocidad del proyectil tras el rebote contra la superficie. Cabe mencionar que si suponemos el impacto contra una superficie plana perfectamente rígida, el ángulo de reflexión será el mismo que el ángulo de incidencia [DESA94]. La velocidad de ricochet puede ser obtenida mediante la siguiente expresión:

$$v_{ricochet} = v_{impacto} \cos\left(\frac{\beta}{2}\right)$$
 (31)

Donde,

 $v_{ricochet} \equiv$  Velocidad de ricochet del proyectil (m/s).  $v_{impacto} \equiv$  Velocidad de impacto contra el objetivo (m/s).  $\beta \equiv$  Ángulo de impacto (°).

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS
$v_{impacto25m}$	279.7 m/s	286.9 m/s	233.5 m/s
β	80.95 °	81.33 °	81.09 °
$v_{ricochet}$	212.76 m/s	217.62 m/s	177.43 m/s

Tabla 21. Velocidad de ricochet para cada proyectil considerando ángulo mínimo

Una vez determinada la velocidad de cada uno de los proyectiles tras el rebote, podemos determinar la distancia mínima a la que deberán estar situada la población circundante de cara a evitar accidentes por impacto ricochet.

Sin embargo, debemos considerar que tras el impacto con el objetivo, el proyectil resultará deformado perdiendo no sólo buena parte de su energía cinética, sino también la forma que le proporcionaba un alto coeficiente balístico antes del impacto. De este modo, aproximamos la forma del proyectil impactado por un cilindro de corta longitud cuyo coeficiente de resistencia se aproximará por un valor constante de 1.15.



Figura 74. Diagrama estimado de la forma del balín antes y después del impacto

De acuerdo a estos parámetros, podemos determinar a qué distancia se produce la atenuación de velocidad necesaria estimada previamente para cada uno de los tres proyectiles.

Marca	H&N Baracuda	JSB Exact King	Beeman FTS	
Calibre	6.35 mm	6.35 mm	6.35 mm	
Masa	2.01 g	1.65 g	1.30 g	
Velocidad Ricochet	212.76 m/s	217.62 m/s	177.43 m/s	
Velocidad límite de impacto	64.48 m/s	70.10 m/s	76.20 m/s	
Temperatura	20°C	20°C	20°C	
Presión	1 atm	1 atm	1 atm	
Humedad Relativa	50 %	50 %	50 %	

Tabla 22. Parámetros para la determinación de la distancia mínima de seguridad

$$V_s = V_0 \cdot e^{-\left(\frac{A}{W_f}\right)\gamma_0 C_D R} \tag{32}$$

Donde,

 $V_s \equiv$  Velocidad del proyectil a una distancia R de la superficie (m/s).

 $V_0 \equiv$  Velocidad de ricochet del proyectil (m/s).

 $A \equiv$  Area transversal del proyectil (m2).

 $W_f \equiv$  Masa del proyectil (Kg).

 $\gamma_0 \equiv$  Peso especifico del aire (N/m3).

 $C_D \equiv$  Coeficiente de resistencia (-).

 $R \equiv$  Distancia del proyectil desde superficie de impacto (m).

Empleando la fórmula anterior que determina la caída de velocidad por la resistencia del aire, y las velocidades límite de impacto sin causar daños en las personas, podemos calcular la distancia mínima requerida a la cual debe mantenerse la población circundante para evitar accidentes por impacto ricochet para cada proyectil tras el impacto contra una superficie plana rígida a 25 metros.

Marca	Distancia mínima de seguridad
H&N Baracuda	5.20 m
JSB Exact	4.05 m
Beeman FTS	2.38 m

Tabla 23. Distancias mínimas de seguridad para impacto ricochet

Una persona situada al menos a la distancia mínima de seguridad del objetivo, no presenta riesgo de sufrir daños por el rebote de un proyectil contra el mismo. Proyectiles con mayor energía cinética inicial, como el H&N Baracuda, requieren una distancia de seguridad mayor de cara a evitar accidentes por impacto ricochet. Este procedimiento puede ser aplicado para determinar las distancias mínimas de seguridad con distintos tipos de objetivos y a diferentes alcances.

### 7. Conclusiones

Durante este proyecto, se ha procedido a efectuar el análisis detallado del funcionamiento de los rifles de aire pre-comprimido, concretamente del modelo Airforce Condor por presentar uno de los diseños con más altas prestaciones del mercado. A través del modelado analítico y numérico de las diferentes etapas del rifle, se ha logrado identificar los parámetros que intervienen en el funcionamiento del mismo, y como dichos parámetros pueden ser optimizados para lograr un mayor rendimiento en las armas de PCP.

La primera parte se ha centrado en el estudio y modelado del depósito de aire comprimido como unidad de potencia del rifle. La misión de este depósito es el almacenamiento de la energía en forma de presión para su posterior uso en el propulsado del proyectil. Los modelos analítico y numérico realizados, muestran una excelente concordancia en sus predicciones de la despresurización de dicho depósito con errores inferiores al 2 %, lo que implica que la hipótesis de solución isotérmica para flujo crítico se ajusta con gran precisión al comportamiento real del presente diseño. Por otro lado, la ausencia de regulador en el modelo estudiado, desemboca en valores de presión más irregulares a la salida de la válvula, pero garantiza la obtención de la máxima potencia posible en los primeros disparos del rifle.

La segunda parte de este documento se ha focalizado en cómo esta energía almacenada en el depósito es transmitida al proyectil proporcionándole una cierta velocidad. Los diversos parámetros implicados en este proceso han sido recogidos en una ecuación analítica genérica que puede ser particularizada para cualquier arma de PCP y proyectil, y que asume la hipótesis de expansión isotérmica del gas, tal y como fue deducido en la sección anterior. Este estudio ha revelado que el cañón es el principal intermediario en la transmisión de energía gas-proyectil, y que su longitud y fricción interna son parámetros que deben ser optimizados con el fin de obtener el máximo rendimiento posible del rifle.

Por otro lado, este modelo analítico del comportamiento del proyectil en el interior del cañón ha sido aplicado y validado experimentalmente para el Airforce Condor del calibre 6,35 mm. Dicho modelo ha demostrado gran exactitud, efectuando predicciones de la velocidad de salida del proyectil en función de la presión interna del depósito con un error inferior al 5 %. Este reducido valor del error porcentual, nos revela que las suposiciones realizadas en la obtención de este modelo predictivo se ajustan considerablemente al modelo real.

La tercera parte se ha basado en el estudio del comportamiento del proyectil a la salida del cañón. En esta sección, se muestra como el rendimiento de un rifle de PCP no sólo depende de su diseño interno sino también del proyectil empleado. Diferentes proyectiles con diferentes masas son estudiados, mostrando como sus trayectorias y penetración dependen de factores como su capacidad de absorción de energía durante su recorrido por el interior del cañón, así como su capacidad de conservarla durante el vuelo en función de su coeficiente balístico.

Por último, este documento lleva a cabo una evaluación de los riesgos inherentes al uso de las armas de PCP, mostrando al lector una herramienta sencilla de cálculo que le permita establecer una serie de distancias de seguridad durante el uso de dichas armas.

El riesgo por impacto directo y por impacto ricochet son analizados de forma separada y calculados para el caso concreto del Airforce Condor. Debido a que este modelo de rifle de PCP constituye uno de los más potentes del mercado, los valores numéricos obtenidos pueden considerarse muy conservativos en comparación con otras armas de aire pre-comprimido. Por otro lado, también se deduce que los valores de distancias de seguridad son altamente dependientes no solo del arma empleada, sino también del proyectil.

Como nota final, cabe recalcar que queda demostrada la extraordinaria potencia que son capaces de desarrollar las armas de aire pre-comprimido, obteniendo valores de energía cercanos a los 100 Julios para ciertos proyectiles. Sin embargo, esta medida de energía debe ser también tenida en cuenta como medida de su riesgo de cara a la prevención de accidentes. Un arma de fuego del calibre .22, usando un proyectil de 3 gramos, genera unos valores de energía en torno a los 140 Julios, por lo que, aunque las limitaciones legales en el uso de armas de aire comprimido son escasas, estas no deben ser nunca subestimadas como un juguete inofensivo puesto que su peligrosidad es evidente.

### 8. Desarrollos futuros

Este proyecto se ha focalizado en la identificación y modelado de las variables que afectan al rendimiento de un arma de aire pre-comprimido, así como en la implementación de una herramienta analítica para el cálculo de las distancias mínimas de seguridad.

Dentro del estudio del rendimiento interno arma, se ha mostrado como las variables de mayor influencia son el diseño proyectil, la longitud del cañón, y la fricción entre ánima y el proyectil. Sin embargo, el estudio de este rendimiento se basa en la optimización de la transferencia energética entre el gas y el proyectil, así como en el cañón como intermediario en la misma. Otro estudio que concierne en gran medida al aprovechamiento energético se focaliza en el análisis de la válvula de disparo y sus tiempos de apertura.

Tal y como ha sido referido en este documento, la válvula de asiento de las armas de PCP es la que se encarga de administrar la cantidad de aire comprimido que expulsa el depósito en cada disparo. Por lo tanto, un tiempo correcto de apertura resulta determinante de cara a evitar un exceso de aire liberado y, en consecuencia, un desaprovechamiento de la energía almacenada en el depósito. Sin embargo, aun cuando el calibre del arma es un parámetro fijo de la misma, el peso del proyectil no lo es, de modo que un mismo usuario puede decidir utilizar un balín u otro según sus necesidades.

Como se ha mostrado en el análisis de la balística interna del Airforce Condor, proyectiles de mayor masa requieren una mayor fuerza para acelerarlos, por lo que una mejora importante a considerar dentro de la familia de las armas de aire pre-comprimido pasaría por la implementación de válvulas regulables que permitieran ajustar la cantidad de aire liberada en función del proyectil empleado. Dentro de esta idea, dos soluciones tecnológicas sencillas para la regulación de esta válvula de asiento serían: la variación de la fuerza ejercida por el muelle que cierra la válvula a través de un tornillo accesible por el usuario, o bien, un conducto de salida de la válvula de sección variable. Ambas soluciones estaría basadas en el mismo concepto, la liberación de la cantidad óptima de energía.

#### 9. Bibliografía

- [WIKI09] "http://es.wikipedia.org/wiki/Arma de aire comprimido", 2009.
- [CHAP09] Chapman, J., "The Practical Guide to Airgun Hunting", 2nd Edition, p.cm. Jaeger Press, ISBN 0-9743872-5-8. 2009.
- [LANE15] Lane, R., "<u>http://www.airriflereviews.co.uk/airgun-feeds/entry/what-is-an-airgun-regulator-a-newbies-guide</u>", 2015
- [CASL98] McCaslin, J.A., "Compressed gas gun", US Patent 5813392, Arlington, Texas. September 1998.
- [AIRF07] Airforce Airguns, "Airforce Condor Owner's Manual", Forth Worth, Texas, 2007.
- [COPC11] Atlas Copco, "Manual del Aire Comprimido" 7º Edición, ISBN: 9789081535809, 2011.
- [DENN11] Denny, M., "The Internal Ballistic of an Airgun", Victoria, British Columbia, Canada V9C 3Z2, DOI: 10.1119/1.3543577, THE PHYSICS TEACHER. Vol. 49, February 2011.
- [OKEE03] O'Keefe Controls CO, "Tutorial of Choked Flow", Trumbull, CT 06611, 2003.
- [HOUS03] House, J.E., "CO2 Pistols and Rifles" ISBN: 0-87349-678-7. 2003.
- [DESA94] ME, "Design Safety Standards Manual", Chapter 4, 1-Personnel and Equipment Shields, Revision, September 1994.
- [BUEN10] Buenache, A.J., "Tecnología neumática: teoría, simulación y diseño y circuitos para la docencia interactiva via web", proyecto final de carrera, 2010.
- [MART92] Martínez, I."Termodinámica básica y aplicada", ISBN: 84-237-0810-1, pags: 81-108, 1992.
- [KLEI13] Kleiser, G., Rauth, V., "Dynamic Modelling of Compressed Air Energy Storage for Small-Scale Industry Applications", International Journal of Energy Engineering 2013, 3(3): 127-137 DOI: 10.5923/j.ijee.20130303.02, 2013.
- [DUTT97] Dutton, J.C., Coverdill, R.E., "Experiments to Study the Gaseous Discharge and Filling of Vessels", Int. J. Engng Ed. Vol. 13, No. 2, p. 123-134, 1997.

- [DEEN81] U.S. Department of Energy, "Manual for the prediction of blast and fragment loadings in structures" DOE/TIC-11268, November 1981.
- [SPAR07] Sparks, J.C., "Basic Terminal Ballistics", The Air Force Research Laboratory (AFRL), Wright-Patterson Educational Outreach, 2007.
- [CARL07] Carlucci, R.E., Jacobson, S.S., "Ballistics: theory and design of guns and ammunition", ISBN: 978-1-4200-6618-0, 2007.

# Anexo I

# Planos Airforce Condor





# Anexo II

Resultados tabulados *Hawke ChairGun Pro* para cada proyectil

## HN Baracuda - 2.01 gramos

Profile	GA	
MV	314	(m/s)
BC	0.04	
AmbT	20	(deg C)
AmbP	1013	(mBar)
Incline	45	(deg)

Range	POI	Cd	Time	Vel.	Vel.	Vel.	Energy	Energy
(m)	(cm)		(sec)	(m/s)	(Mach)	(%)	(Joule)	(%)
0	-5.08	0.35	0	314.3	0.92	100	99.24	100
5	-3.49	0.32	0.02	306	0.89	97.4	94.12	94.84
10	-2.09	0.3	0.03	298.6	0.87	95	89.61	90.29
15	-0.87	0.28	0.05	291.8	0.85	92.9	85.58	86.24
20	0.13	0.27	0.07	285.5	0.83	90.9	81.93	82.56
25	0.92	0.25	0.09	279.7	0.81	89	78.62	79.22
30	1.49	0.24	0.1	274.3	0.8	87.3	75.63	76.21
35	1.83	0.23	0.12	269.2	0.78	85.7	72.85	73.41
40	1.94	0.23	0.14	264.4	0.77	84.1	70.25	70.79
45	1.79	0.22	0.16	259.7	0.76	82.6	67.78	68.31
50	1.39	0.22	0.18	255.2	0.74	81.2	65.47	65.97
55	0.71	0.21	0.2	250.9	0.73	79.9	63.27	63.76
60	-0.23	0.21	0.22	246.8	0.72	78.5	61.21	61.68
65	-1.46	0.2	0.24	242.8	0.71	77.3	59.24	59.7
70	-2.99	0.2	0.26	239	0.7	76	57.38	57.82
75	-4.83	0.2	0.28	235.2	0.69	74.8	55.59	56.02
80	-6.97	0.2	0.3	231.6	0.67	73.7	99.68	53.88
85	-9.43	0.19	0.32	228	0.66	72.5	99.69	52.23
90	-12.23	0.19	0.35	224.5	0.65	71.4	99.69	50.64
95	-15.38	0.19	0.37	221.1	0.64	70.3	99.69	49.11
100	-18.88	0.19	0.39	217.7	0.63	69.3	99.7	47.63

## JSB King - 1.65 gramos

Profile	GA	
MV	335	(m/s)
BC	0,0360	
AmbT	20,0	(deg C)
AmbP	1013,00	(mBar)
Incline	45	(deg)

Range	POI	Cd	Time	Vel.	Vel.2	Vel.3	Energy	Energy4
(m)	(cm)		(sec)	(m/s)	(Mach)	(%)	(Joule)	(%)
0	-4,45	0,4442	0,000	335,3	0,98	100,0	92,72	100,00
5	-3,03	0,3862	0,015	322,5	0,94	96,2	85,81	92,55
10	-1,78	0,3376	0,031	311,8	0,91	93,0	80,22	86,52
15	-0,71	0,3085	0,047	302,7	0,88	90,3	75,57	81,51
20	0,17	0,2876	0,064	294,4	0,86	87,8	71,50	77,12
25	0,85	0,2686	0,081	286,9	0,84	85,6	67,90	73,24
30	1,32	0,2512	0,099	280,0	0,82	83,5	64,69	69,77
35	1,57	0,2365	0,117	273,8	0,80	81,7	61,83	66,69
40	1,58	0,2300	0,136	267,9	0,78	79,9	59,20	63,85
45	1,36	0,2238	0,154	262,3	0,76	78,2	56,76	61,22
50	0,89	0,2178	0,174	257,0	0,75	76,7	54,47	58,75
55	0,15	0,2122	0,193	251,9	0,73	75,1	52,34	56,45
60	-0,87	0,2068	0,213	247,0	0,72	73,7	50,34	54,29
65	-2,17	0,2016	0,234	242,4	0,71	72,3	48,46	52,27
70	-3,76	0,1984	0,255	237,9	0,69	71,0	46,69	50,36
75	-5,67	0,1967	0,276	233,6	0,68	69,7	45,01	48,54
80	-7,87	0,1951	0,297	229,4	0,67	68,4	43,40	46,81
85	-10,42	0,1936	0,319	225,3	0,66	67,2	41,86	45,15
90	-13,32	0,1920	0,342	221,3	0,64	66,0	40,38	43,56
95	-16,57	0,1906	0,365	217,4	0,63	64,8	38,97	42,03
100	-20,17	0,1891	0,388	213,6	0,62	63,7	37,62	40,58

## Beeman FTS - 1.30 gramos

Profile	G1	
MV	350	(m/s)
BC	0,0120	
AmbT	20,0	(deg C)
AmbP	1013,00	(mBar)
Incline	45	(deg)

Range	POI	Cd	Time	Vel.	Vel.	Vel.	Energy	Energy
(m)	(cm)		(sec)	(m/s)	(Mach)	(%)	(Joule)	(%)
0	-3,81	0,5002	0,000	349,5	1,02	100,0	79,39	100,00
5	-1,83	0,3487	0,015	310,7	0,91	88,9	62,74	79,02
10	-0,03	0,2802	0,032	284,7	0,83	81,5	52,68	66,35
15	1,56	0,2439	0,050	264,9	0,77	75,8	45,62	57,46
20	2,90	0,2253	0,070	248,2	0,72	71,0	40,04	50,43
25	3,96	0,2139	0,091	233,5	0,68	66,8	35,44	44,63
30	4,70	0,2088	0,113	220,1	0,64	63,0	31,49	39,67
35	5,08	0,2041	0,136	207,8	0,61	59,5	28,07	35,35
40	5,06	0,2033	0,161	196,3	0,57	56,2	25,06	31,56
45	4,58	0,2033	0,187	185,5	0,54	53,1	22,37	28,17
50	3,61	0,2032	0,215	175,3	0,51	50,1	19,97	25,15
55	2,06	0,2045	0,244	165,6	0,48	47,4	17,82	22,45
60	-0,11	0,2064	0,275	156,4	0,46	44,7	15,89	20,02
65	-3,00	0,2082	0,308	147,6	0,43	42,2	14,16	17,83
70	-6,68	0,2100	0,343	139,2	0,41	39,8	12,60	15,87
75	-11,27	0,2123	0,380	131,3	0,38	37,6	11,20	14,10
80	-16,85	0,2148	0,419	123,7	0,36	35,4	9,94	12,52
85	-23,60	0,2171	0,461	116,4	0,34	33,3	8,81	11,10
90	-31,61	0,2193	0,506	109,6	0,32	31,3	7,80	9,83
95	-41,06	0,2214	0,553	103,0	0,30	29,5	6,90	8,69
100	-52,17	0,2237	0,603	96,8	0,28	27,7	6,10	7,68

# Anexo III

# Desarrollo cálculos analíticos en Derive

$$#1: \quad v = \sqrt{\frac{2}{2.01 \cdot 10}} \cdot \left[ 2.06 \cdot 10^{-7} \cdot 0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.00049} \right]$$

$$#2: \quad v = \sqrt{\frac{2}{2.01 \cdot 10}} \cdot \left[ 2.06 \cdot 10^{-7} \cdot 0.61 \right]$$

$$#2: \quad v = \sqrt{\frac{2}{2.01 \cdot 10}} \cdot \left[ 2.06 \cdot 10^{-7} \cdot 0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.00049} \right]$$

$$#3: \quad v = 316.8467306$$

$$#4: \quad v = \sqrt{\frac{2}{2.01 \cdot 10}} \cdot \left[ p \cdot 0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.00049} \right]$$

$$#5: \quad v = \sqrt{\frac{2}{2.01 \cdot 10}} \cdot \left[ p \cdot 0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.73 \cdot 2.06 \cdot 10^{-3} \cdot 3.167 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.00049} \right]$$

$$#5: \quad v = \sqrt{\frac{2}{2.01 \cdot 10}} \cdot \left[ p \cdot 0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.73 \cdot p \cdot 3.167 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.73 \cdot p \cdot 3.167 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.73 \cdot p \cdot 3.167 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.73 \cdot p \cdot 3.167 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.73 \cdot p \cdot 3.167 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.73 \cdot p \cdot 3.167 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.73 \cdot p \cdot 3.167 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61}{0.00049} \right] - \frac{1}{0.00049 \cdot 1} + \frac{1}{0.00049 \cdot 1} + \frac{1}{0.00049} + \frac{1}{0.00049$$

#7: 
$$v = \sqrt{\frac{2}{-3} \cdot \left[ p \cdot 10^{-3} \cdot 0.00049 \cdot LN \left[ 1 + \frac{3.176 \cdot 10^{-3} \cdot 0.61}{0.00049} \right] \right]}$$

$$5 - 5 - 5 - 5 - 0.73 \cdot p \cdot 10^{-5} \cdot 3.167 \cdot 10^{-5} \cdot 0.61 \\ \end{pmatrix}$$

$$\#8: \qquad v = 31.29778831 \cdot \sqrt{\left(\frac{p}{m}\right)} \\ \#9: \quad v = 31.29778831 \cdot \sqrt{\left(\frac{p}{2.01}\right)} \\ \#10: \qquad v = 22.07575777 \cdot \sqrt{p}$$

$$\begin{aligned} & \# 11: \quad \frac{2}{3} \cdot \frac{11340 \cdot 311 \cdot 8}{1200000} \cdot \frac{0.0046}{0.0046} + 0.00635} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{11340}{8050} \right)^{1/2} \right] \\ & \# 12: \qquad [281.9282846] \\ & \# 13: \quad TAN(\beta)^3 = 281.9282846 \\ & \# 14: \quad APPROX(SOLVE(TAN(\beta)^3 = 281.9282846, \beta, Rea1)) \\ & \# 15: \qquad \beta = 1.419456364 \lor \beta = -1.722136288 \lor \beta = 4.561049018 \\ & \# 16: \quad TAN(\beta)^3 = \frac{2}{3} \cdot \frac{11340 \cdot 284.7}{12000000} \cdot \frac{0.00362^2 + 0.00635^2}{0.00362 \cdot 0.00635} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{11340}{8050} \right)^{1/2} \right] \\ & \# 17: \quad \frac{2}{3} \cdot \frac{11340 \cdot 284.7}{12000000} \cdot \frac{0.00362^2 + 0.00635^2}{0.00362 \cdot 0.00635} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{11340}{8050} \right)^{1/2} \right] \\ & \# 18: \qquad [259.5488327] \\ & \# 19: \quad TAN(\beta)^3 = 259.5488327 \\ & \# 20: \quad APPROX(SOLVE(TAN(\beta)^3 = 259.5488327, \beta, Rea1)) \\ & \# 12: \qquad \beta = 1.415292952 \lor \beta = -1.726299701 \lor \beta = 4.556885605 \\ & \# 22: \quad TAN(\beta)^3 = \frac{2}{3} \cdot \frac{11340 \cdot 279.7}{12000000} \cdot \frac{0.0056^2 + 0.00635^2}{0.0056 \cdot 0.00635} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{11340}{8050} \right)^{1/2} \right] \\ & \# 23: \quad \frac{2}{3} \cdot \frac{11340 \cdot 279.7}{12000000} \cdot \frac{0.0056^2 + 0.00635^2}{0.0056 \cdot 0.00635} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{11340}{8050} \right)^{1/2} \right] \\ & \# 24: \qquad [217.2715135] \end{aligned}$$

#25: TAN(β)<sup>3</sup> = 217.2715135  
#26: APPROX(SOLVE(TAN(β)<sup>3</sup> = 217.2715135, β, Real))  
#27: 
$$β = 4.547557273 \lor β = -1.735628033 \lor β = 1.405964619$$
  
#28:  $\frac{2}{3} \cdot \frac{11340 \cdot 286.9}{1200000} \cdot \frac{0.0046^{2} + 0.00635^{2}}{0.0046 \cdot 0.00635} \cdot \left[1 + \left(\frac{11340}{8050}\right)^{1/2}\right]$   
#29: [238.6973094]  
#30: TAN(β)<sup>3</sup> = 238.6973094  
#31: APPROX(SOLVE(TAN(β)<sup>3</sup> = 238.6973094, β, Real))  
#32:  $β = 1.410964319 \lor β = -1.730628334 \lor β = 4.552556973$   
#33:  $\frac{2}{3} \cdot \frac{11340 \cdot 233.5^{2}}{12000000} \cdot \frac{0.00362^{2} + 0.00635^{2}}{0.00362 \cdot 0.00635} \cdot \left[1 + \left(\frac{11340}{8050}\right)^{1/2}\right]$   
#34: [174.5894173]  
#35: TAN(β)<sup>3</sup> = 174.5894173  
#36: APPROX(SOLVE(TAN(β)<sup>3</sup> = 174.5894173, β, Real))  
#37:  $β = 1.39374897 \lor β = 4.535341624 \lor β = -1.747843682$ 

$$= [a/w] \cdot y \cdot d \cdot r$$

$$#1: y = x \cdot e$$

$$#2: y = x \cdot e$$

$$= - [a/w] \cdot y \cdot d \cdot r$$

$$#3: 64.48 = 212.76 \cdot e$$

$$= - 0.2295941072 \cdot r$$

$$#4: APPROX(SOLVE(64.48 = 212.76 \cdot e^{-0.2295941072 \cdot r}, r, Real))$$

$$#5: r = 5.199652927$$

$$= - 0.279687367 \cdot r$$

$$#6: 70.1 = 217.62 \cdot e^{-0.279687367 \cdot r}, r, Real))$$

$$#8: r = 4.050335346$$

$$#9: 76.2 = 177.43 \cdot e^{-0.3549878119 \cdot r}, r, Real))$$

$$#10: APPROX(SOLVE(76.2 = 177.43 \cdot e^{-0.3549878119 \cdot r}, r, Real))$$

$$#11: r = 2.38096823$$

# Anexo IV

# Tablas Balísticas

(Unidades Imperiales)

M.V. (fps)	10 yds.	20 yds.	30 yds.	40 yds.	50 yds.
400	360/+1.90	323/+2.61	290/0.00	261/-6.73	235/-18.6
425	382/+1.57	344/+2.26	309/0.00	278/-5.90	250/-16.3
450	405/+1.29	364/+1.95	327/0.00	294/-5.20	264/-14.4
475	428/+1.05	385/+1.70	346/0.00	311/-4.60	280/-12.8
500	451/+0.84	406/+1.48	365/0.00	328/-4.09	295/-11.4
525	474/+0.67	427/+1.29	384/0.00	345/-3.65	310/-10.2
550	497/+0.52	448/+1.12	403/0.00	362/-3.26	326/-9.18
575	520/+0.39	469/+0.98	422/0.00	380/-2.93	341/-8.28
600	542/+0.27	490/+0.86	441/0.00	397/-2.64	357/-7.49
625	565/+0.17	510/+0.75	460/0.00	415/-2.39	373/-6.80
650	588/+0.08	531/+0.66	480/0.00	432/-2.17	389/-6.20
675	610/+0.00	552/+0.57	498/0.100	449/-1.97	404/-5.66
700	633/-0.07	572/+0.50	517/0.00	466/-1.80	420/-5.19
725	655/-0.13	592/+0.43	535/0.00	483/-1.64	435/-4.78
750	677/-0.19	612/+0.37	553/0.00	500/-1.51	450/-4.41

## Ballistic Coefficient = 0.012

### Ballistic Coefficient = 0.014

M.V.					1.	
(fps)	10 yds.	20 yds.	30 yds.	40 yds.	50 yds.	
400	365/+1.78	333/+2.45	304/0.00	278/-6.21	253/-16.9	
425	388/+1.46	354/+2.11	323/0.00	295/-5.44	269/-14.9	
450	411/+1.19	373/+1.83	343/0.00	313/-4.79	285/-13.1	
475	434/+0.96	397/+1.58	362/0.00	330/-4.23	302/-11.6	
500	458/+0.77	418/+1.38	382/0.00	348/-3.76	318/-10.4	
525	481/+0.60	440/+1.20	402/0.00	367/-3.35	335/-9.28	
550	504/+0.45	461/+1.04	422/0.00	385/-3.00	351/-8.33	
575	527/+0.33	483/+0.91	442/0.00	404/-2.69	368/-7.51	
600	550/+0.22	504/+0.79	462/0.00	422/-2.42	385/-6.79	
625	573/+0.12	526/+0.69	481/0.00	440/-2.19	402/-6.16	
650	596/+0.04	547/+0.60	501/0.00	459/-1.98	419/-5.61	
675	619/-0.04	568/+0.52	521/0.00	477/-1.80	436/-5.13	
700	642/-0.10	589/+0.45	540/0.00	495/-1.64	453/-4.70	
725	664/-0.16	609/+0.39	559/0.00	512/-1.50	469/-4.31	
750	686/-0.22	630/+0.33	578/0.00	530/-1.37	485/-3.98	
M.V. (fps)	10 yds.	20 yds.	30 yds.	40 yds.	50 yds.	
---------------	-----------	-----------	----------	-----------	-----------	
400	369/+1.69	341/+2.34	315/0.00	291/-5.84	268/-15.8	
425	392/+1.38	362/+2.01	334/0.00	309/-5.11	285/-13.9	
450	416/+1.12	384/+1.74	354/0.00	327/-4.50	302/-12.2	
475	439/+0.90	406/+1.50	375/0.00	346/-3.97	319/-10.8	
500	463/+0.71	428/+1.30	395/0.00	365/-3.53	337/-9.66	
525	486/+0.55	450/+1.13	416/0.00	384/-3.14	354/-8.64	
550	510/+0.41	472/+0.98	436/0.00	403/-2.81	372/-7.75	
575	533/+0.29	494/+0.86	457/0.00	422/-2.52	390/-6.99	
600	556/+0.18	516/+0.74	477/0.00	441/-2.27	408/-6.32	
625	589/+0.09	537/+0.65	498/0.00	460/-2.05	426/-5.73	
650	603/+0.01	559/+0.56	518/0.00	480/-1.85	444/-5.21	
675	626/-0.07	580/+0.48	538/0.00	498/-1.68	461/-4.76	
700	649/-0.13	602/+0.41	558/0.00	517/-1.53	479/-4.36	
725	672/-0.19	623/+0.35	577/0.00	535/-1.39	496/-4.00	
750	694/-0.24	643/+0.30	596/0.00	553/-1.27	512/-3.68	

M.V.						
(fps)	10 yds.	20 yds.	30 yds.	40 yds.	50 yds.	
400	372/+1.63	347/+2.25	323/0.00	301/-5.57	280/-15.0	
425	396/+1.32	369/+1.94	344/0.00	320/-4.88	298/-13.1	
450	420/+1.07	391/+1.67	364/0.00	339/-4.29	316/-11.6	
475	443/+0.85	413/+1.44	385/0.00	358/-3.78	334/-10.3	
500	467/+0.67	435/+1.25	406/0.00	378/-3.36	352/-9.14	
525	490/+0.51	458/+1.08	427/0.00	398/-2.99	379/-8.17	
550	514/+0.38	480/+0.94	448/0.00	418/-2.67	389/-7.33	
575	537/+0.26	502/+0.82	469/0.00	437/-2.40	408/-6.60	
600	561/+0.16	524/+0.71	490/0.00	457/-2.15	426/-5.97	
625	584/+0.06	546/+0.61	510/0.00	477/-1.94	445/-5.41	
650	608/-0.02	568/+0.53	531/0.00	496/-1.76	463/-4.92	
675	631/-0.09	590/+0.45	552/0.00	516/-1.59	482/-4.49	
700	654/-0.15	612/+0.39	572/0.00	535/-1.45	500/-4.11	
725	677/-0.21	633/+0.33	592/0.00	554/-1.32	517/-3.77	
750	700/-0.26	654/+0.28	612/0.00	572/-1.20	535/-3.46	

M.V. (fps)	10 yds.	20 yds.	30 yds.	40 yds.	50 yds.
400	375/+1.57	352/+2.19	330/0.00	310/-5.37	291/-14.4
425	399/+1.28	374/+1.88	351/0.00	329/-4.69	309/-12.6
450	422/+1.03	396/+1.62	372/0.00	349/-4.12	327/-11.1
475	446/+0.82	419/+1.40	393/0.00	369/-3.64	346/-9.83
500	470/+0.64	442/+1.21	414/0.00	389/-3.23	365/-8.74
525	494/+0.48	464/+1.05	436/0.00	409/-2.87	384/-7.81
550	517/+0.35	487/+0.91	457/0.00	430/-2.57	403/-7.01
575	541/+0.24	509/+0.79	479/0.00	450/-2.30	422/-6.31
600	565/+0.13	532/+0.68	500/0.00	470/-2.07	442/-5.71
625	588/+0.04	554/+0.59	521/0.00	490/-1.86	460/-5.17
650	612/-0.03	576/+0.50	542/0.00	510/-1.68	480/-4.70
675	635/-0.10	598/+0.43	563/0.00	530/-1.53	498/-4.29
700	659/-0.17	620/+0.37	584/0.00	549/-1.38	517/-3.92
725	682/-0.22	642/+0.31	604/0.00	569/-1.26	535/-3.59
750	705/-0.30	663/+0.26	624/0.00	588/-1.15	553/-3.30

M.V. (fps)	10 yds.	20 yds.	30 yds.	40 yds.	50 yds.	
400	377/+1.53	356/+2.13	336/0.00	317/-5.20	299/-13.9	
425	401/+1.24	378/+1.83	357/0.00	337/-4.55	318/-12.2	
450	425/+1.00	401/+1.58	378/0.00	357/-4.00	337/-10.7	
475	449/+0.79	424/+1.36	400/0.00	378/-3.53	356/-9.49	
500	473/+0.61	447/+1.18	422/0.00	398/-3.13	376/-8.44	
525	496/+0.46	469/+1.02	443/0.00	419/-2.78	395/-7.54	
550	520/+0.33	492/+0.88	465/0.00	439/-2.48	415/-6.76	
575	544/+0.22	515/+0.76	487/0.00	460/-2.22	435/-6.09	
600	568/+0.12	537/+0.66	508/0.00	481/-2.00	454/-5.50	
625	592/+0.03	560/+0.57	530/0.00	501/-1.80	474/-4.98	
650	615/-0.05	582/+0.49	551/0.00	522/-1.63	493/-4.53	
675	639/-0.12	605/+0.41	572/0.00	542/-1.47	512/-4.12	
700	662/-0.18	627/+0.35	593/0.00	562/-1.33	532/-3.77	
725	686/-0.23	648/+0.29	614/0.00	581/-1.21	550/-3.45	
750	709/-0.28	670/+0.24	634/0.00	601/-1.10	568/-3.17	

M.V. (fps)	10 yds.	20 yds.	30 yds.	40 yds.	50 yds.
400	380/+1.48	361/+2.07	343/0.00	326/-5.02	310/-13.3
425	404/+1.20	384/+1.78	365/0.00	346/-4.38	329/-11.6
450	428/+0.96	407/+1.53	386/0.00	367/-3.85	349/-10.3
475	452/+0.76	430/+1.32	408/0.00	388/-3.39	369/-9.09
500	476/+0.58	453/+1.14	431/0.00	409/-3.01	389/-8.08
525	500/+0.44	475/+0.98	453/0.00	430/-2.68	409/-7.22
550	524/+0.31	499/+0.85	475/0.00	452/-2.39	430/-6.48
575	548/+0.19	522/+0.73	497/0.00	473/-2.14	450/-5.83
600	572/+0.10	545/+0.63	519/0.00	494/-1.92	470/-5.26
625	596/+0.01	567/+0.54	540/0.00	515/-1.73	490/-4.76
650	619/-0.07	590/+0.46	562/0.00	536/-1.56	510/-4.33
675	643/-0.13	613/+0.39	584/0.00	556/-1.41	529/-3.94
700	667/-0.19	635/+0.33	605/0.00	577/-1.28	549/-3.60
725	690/-0.25	657/+0.28	626/0.00	597/-1.16	569/-3.29
750	714/-0.30	679/+0.23	647/0.00	617/-1.05	588/-3.02

M.V. (fps)	10 yds.	20 yds.	30 yds.	40 yds.	50 yds.	
400	383/+1.43	367/+2.00	352/0.00	337/-4.79	323/-12.6	
425	407/+1.15	390/+1.71	374/0.00	359/-4.19	344/-11.1	
450	432/+0.92	414/+1.47	396/0.00	380/-3.67	364/-9.75	
475	456/+0.72	437/+1.27	419/0.00	402/-3.24	385/-8.63	
500	480/+0.55	460/+1.09	442/0.00	423/-2.87	406/-7.68	
525	504/+0.40	484/+0.94	464/0.00	445/-2.55	427/-6.85	
550	528/+0.28	507/+0.81	487/0.00	467/-2.28	448/-6.14	
575	552/+0.17	530/+0.70	509/0.00	489/-2.04	469/-5.53	
600	576/+0.07	554/+0.60	532/0.00	510/-1.83	490/-4.99	
625	600/-0.01	577/+0.51	554/0.00	532/-1.64	511/-4.51	
650	624/-0.09	600/+0.44	576/0.00	553/-1.48	531/-4.09	
675	648/-0.15	623/+0.37	598/0.00	574/-1.34	552/-3.72	
700	672/-0.21	646/+0.31	620/0.00	596/-1.21	572/-3.40	
725	696/-0.27	668/+0.26	642/0.00	616/-1.10	592/-3.10	
750	719/-0.31	690/+0.21	663/0.00	637/-0.99	612/-2.84	

M.V. (fps)	10 yds.	20 yds.	30 yds.	40 yds.	50 yds.
400	386/+1.39	372/+1.95	358/0.00	346/-4.64	333/-12.2
425	410/+1.11	395/+1.67	381/0.00	367/-4.05	354/-10.7
450	434/+0.88	419/+1.43	404/0.00	389/-3.55	376/-9.39
475	458/+0.69	442/+1.23	427/0.00	412/-3.13	397/-8.31
500	483/+0.52	466/+1.06	450/0.00	434/-2.77	418/-7.39
525	507/+0.38	489/+0.91	472/0.00	456/-2.47	440/-6.60
550	531/+0.26	513/+0.79	495/0.00	478/-2.20	461/-5.92
575	555/+0.15	536/+0.68	518/0.00	500/-1.97	483/-5.32
600	580/+0.06	560/+0.58	541/0.00	522/-1.76	504/-4.80
625	604/-0.03	583/+0.50	564/0.00	544/-1.59	526/-4.34
650	628/-0.10	607/+0.42	586/0.00	566/-1.43	547/-3.94
675	652/-0.17	630/+0.35	609/0.00	588/-1.29	568/-3.58
700	676/-0.22	653/+0.29	631/0.00	610/-1.16	589/-3.26
725	700/-0.28	676/+0.24	653/0.00	631/-1.05	609/-2.98
750	724/-0.32	699/+0.19	675/0.00	652/-0.95	630/-2.72

M.V.								
(fps)		10 yds.	20 yds.	30 yds.	40 yds.	50 yds.		
400		387/+1.36	375/+1.91	363/0.00	352/-4.53	341/-11.9		
425		412/+1.09	399/+1.63	386/0.00	374/-3.95	362/-10.4		
450		436/+0.86	423/+1.40	409/0.00	397/-3.47	384/-9.13		
475		460/+0.67	446/+1.20	432/0.00	419/-3.05	406/-8.08		
500		485/+0.50	470/+1.04	456/0.00	442/-2.70	428/-7.19		
525		509/+0.36	494/+0.89	479/0.00	464/-2.40	450/-6.41		
550		534/+0.24	518/+0.77	502/0.00	487/-2.14	472/-5.75		
575		558/+0.14	541/+0.66	525/0.00	509/-1.92	494/-5.17		
600		582/+0.04	565/+0.56	548/0.00	532/-1.72	516/-4.66		
625		606/-0.04	588/+0.48	571/0.00	554/-1.54	537/-4.22		
650		631/-0.11	612/+0.41	594/0.00	576/-1.39	559/-3.82		
675		655/-0.18	635/+0.34	616/0.00	598/-1.25	580/-3.47		
700		679/-0.23	659/+0.28	639/0.00	620/-1.13	602/-3.16		
725		703/-0.28	682/+0.23	661/0.00	642/-1.02	623/-2.88		
750		727/-0.33	705/+0.18	684/0.00	663/-0.92	643/-2.64		

