



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE CRONÓGRAFO BALÍSTICO

Ismael Figueredo^{1,2}, Nelson Falcon²

¹ Organización Internacional de Policía Criminal (INTERPOL) OCN Valencia, Carabobo, Venezuela. ismael_figueredo@gmail.com

² Laboratorio de Física de la Atmósfera y del Espacio Ultraterrestre, Dpto. de Física, Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología Universidad de Carabobo. Venezuela. nelsonfalconv@gmail.com

Resumen

El cronógrafo balístico es un instrumento para medir la velocidad lineal de las balas. Actualmente la empresa venezolana Compañía Anónima de Industrias Militares (CAVIM) dedicada a la fabricación de municiones, emplea un cronógrafo de tecnología austriaca para el control de calidad del proceso productivo. Se presenta el diseño y construcción de un cronógrafo balístico. El equipo cuenta con dos paneles emisores de LED IR (XC88-50) con tiempo de respuesta en milisegundos, como emisor y el otro como receptor, conectados a un amplificador seguidor de voltaje (CA3140A) luego a un amplificador de estado sólido y finalmente a un comparador de tensión (CA3160) encargado de procesar la señal, enviada a un osciloscopio para registrar los tiempos de tránsito entre los paneles, determinando así la velocidad horizontal del proyectil. Los resultados muestran su eficiencia en pruebas realizadas con municiones calibres 0.38, 5.56, 7.62 y 9 mm .

Palabras clave: Balística: Exterior, Cronógrafo Balístico, Velocidad Lineal

Design and Construction of Ballistic Chronograph

Abstract

The ballistic chronograph is an instrument for measuring the linear velocity of bullets. Currently the company Industrias Militares Anónimas Venezolanas (CAVIM) dedicated to the manufacture of ammunition uses an Austrian technology chronograph for quality control of the production process. The design and construction of a ballistic chronograph is presented. The equipment has two IR LED emitter panels (XC88-50) with response time in milliseconds, as emitter and the other as receiver, connected to a voltage follower amplifier (CA3140A) then to a solid state amplifier and finally to a voltage comparator (CA3160) in charge of processing the signal, sent to an oscilloscope to record the transit times between the panels, thus determining the horizontal velocity of the projectile. The results show its efficiency in tests carried out with 0.38, 5.56, 7.62 and 9 mm caliber ammunition.

Key words: Ballistics: Exterior, Ballistic Chronograph, Linear Velocity.

Introducción

La balística es la rama de la Ingeniería que estudia las características de los proyectiles en movimiento y sus efectos antes durante y después de ser lanzado. Desde tiempos remotos el estudio de la balística ha sido de gran interés, desde el siglo XVI se ha estudiado el movimiento parabólico de manera científica. En 1537 Nicolás Fontana, conocido como Tartaglia, establece los principios matemáticos de la balística estudiando un proyectil lanzado desde un cañón. Todo esto fue descrito en su obra “*Nouva Scientia*”.(Gutiérrez, 2007).

Modernamente, la balística se clasifica principalmente en tres partes: Según su estudio (Balística Interior, Exterior, Terminal o de Efectos), desde el punto de vista científico (Balística Teórica y Experimental), balística forense encargada de los aspectos de identificación y reconstrucción. Para el análisis de las municiones empleadas en este estudio se considera solamente la balística exterior. Esta puede definirse como todos los fenómenos presentes en su trayectoria desde el momento que abandona el arma hasta que impacta o cae por inercia.

En Venezuela los ensayos de balística han estado relacionados íntimamente con el desarrollo militar, desde el año 1945 en que se creó una fábrica de armamento dependiente del Ministerio de la Defensa para elaborar piezas y recuperar armas deterioradas, posteriormente en 1969 en Maracay se crea la fábrica de armamento y municiones que a partir de 1974 se denominará Compañía Anónima Venezolana de Industrias Militares (CAVIM).

La balística es importante ya que se emplea en el control de calidad de los procesos de fabricación de municiones mediante ensayos tales como: sensibilidad, durabilidad, determinación de la carga (pólvora), calibración, presiones en recámara y en boca, medición de velocidad lineal de la bala, entre otros, en empresas de desarrollo

militar como Compañía Anónima Venezolana de Industrias Militares (CAVIM). También es importante porque se emplea para la determinación de aspectos criminalísticos y forenses en los cuerpos científicos policiales, como lo es el Cuerpo de Investigaciones Científicas, Penales y Criminalísticas (CICPC) en Venezuela.

Finalmente se plantea en este estudio aplicar los principios de balística exterior en la determinación de la velocidad lineal de proyectiles de bajo calibre producidos por la Compañía Anónima Venezolana de Industrias Militares (CAVIM). La velocidad lineal de un proyectil balístico de armas portátiles (balas) esta determinado por la mezcla explosiva de la pólvora (cantidad y pureza), luego la medida de la velocidad lineal es también un criterio de calidad de la mezcla explosiva.

El objetivo del presente trabajo es mostrar el diseño y construcción de un medidor de velocidad de proyectiles (Cronógrafo balístico) de uso Industrial, en la determinación para el control de calidad de los proyectiles; y también podría tener aplicaciones didácticas en las practicas de Física Universitaria.

Materiales y Métodos

El cronógrafo balístico es un dispositivo diseñado para medir el tiempo requerido por el proyectil para desplazarse en dos paneles sensores que interceptan su trayectoria de vuelo. Este consta de varios circuitos y sub-circuitos acoplados a la estructura de medición, entre los eventos registra el tiempo transcurrido y permite el procesamiento de las señales involucradas en la medida (ver figura 1). El receptor recibe continuamente la señal infrarroja, que es interrumpida al pasar el proyectil.

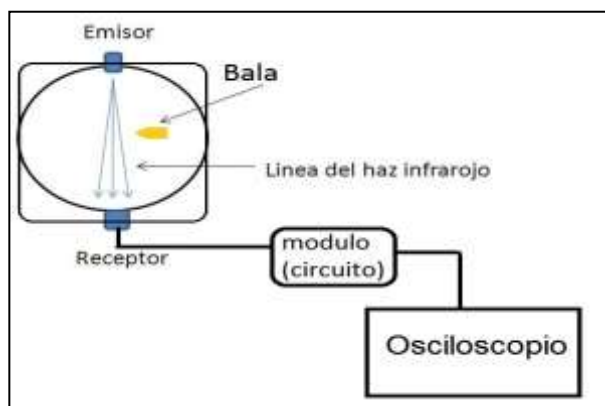


Fig. 1. Esquema del cronógrafo balístico.

El emisor es un diodo o LED Emisor IR (XC88-50) alimentado con 5v de corriente continua. El circuito receptor constar de una configuración de un amplificador operacional (LM741) seguido de un amplificador (2N3906) para amplificar la señal luego un comparador (CA3140) para controlar el voltaje (figura 2)

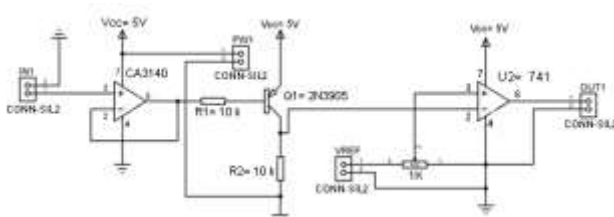


Fig.2. Circuito receptor del Cronógrafo Balístico

Luego OUT1 genera una señal que vamos a procesar con un microcontrolador PIC16F87/88 lo cual es encargado de analizar y recolectar la los tiempos necesarios para el cálculo de la velocidad teniendo en cuenta que los paneles esta separados por un distancia de 2 metros entre panel inicial y panel final, cuando se realice el disparo la bala interrumpe el panel 1 activando internamente un cronometro y luego a pasar por el panel final desactiva el mismo generando la velocidad en una pantalla 16x2.

La regleta del receptor está compuesta por fotodiodos modelo TFKBPW-41, con tiempos de respuesta del orden de los milisegundos y el emisor es un diodo LED Emisor IR (XC88-50), cuyo tiempo de repuesta es del orden de los

milisegundos. Por ello es necesario hacer un arreglo que incluye un amplificador operacional convertidor de corriente a voltaje empleado en sensores, que no pueden ser activados por las corrientes de baja intensidad que salen del sensor dando como resultado una salida amplificada de voltaje V_{J1AO} , luego este voltaje es conectado al osciloscopio.

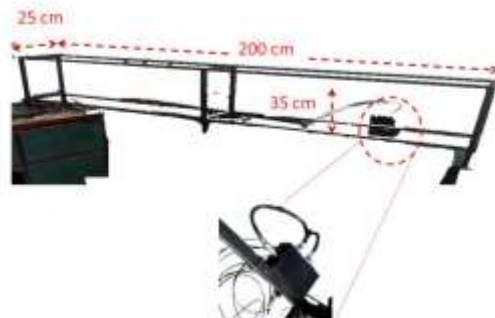


Fig. 3. Dimensiones del cronógrafo balístico.

La estructura de los paneles consiste en una caja rectangular hueca de tubos cuadrados de área 2 cm^2 , con 4 soportes para ajustar la altura donde las dimensiones de la misma están dadas en la figura 3 Luego que se tienen los circuitos se procede al ensamblaje y empotrado en una caja rectangular donde se tienen la dos salidas de cada panel a ser conectadas, mediante cables coaxiales, al osciloscopio.

Para todos los calibres realizamos el mismo procedimiento de calibración variando la distancia entre el cañón fijo y el final del túnel de disparo de CAVIM , de 100 m de longitud, de igual forma obtuvimos la desviación estándar y su pulso característico.

Tabla 1. Características de los proyectiles usados.

Calibre	Carga (pólvora) g $\pm 0,01$	Longitud de la bala(mm) $\pm 0,1 \text{ mm}$
9x19 mm GN	0,42	15,6
.38 SPL (9x29mm)	0,31	19,0
7.62x51	2,96	25,5
5.56x45 mm	1,60	14,3

Luego se utilizan armas de los respectivos calibres que especifica la tabla 1, y se efectúan series de 10 disparos, dentro del túnel 1 de laboratorio balístico a una distancia de 1 metro al cronógrafo balístico ya que el cronógrafo está diseñado para armas portátiles.

En la trayectoria balística de armas de fuego manuales (pistolas, revólveres, rifles de asalto, ametralladoras) se considera que los efectos de la gravedad y del viento son despreciable para los disparos efectivos (Klimi 2014, Coupland et al 2011). Solo se corrige la trayectoria balística por efectos de gravedad y viento para puntería especial con fusiles y munición de francotirador, de mucho mayor alcance que los disparos efectivos y están fuera del alcance de este trabajo. Bajo esas consideraciones la aceleración del proyectil de masa m , solo está afectado por la disipación resistiva del aire, que puede modelarse por un término resistivo proporcional a la velocidad (función de Raleigh). De modo que la ecuación de movimiento resulta:

$$m \frac{dV_y(t)}{dt} = -kV_y(t) \quad (1)$$

Donde k es el coeficiente de disipación de Raleigh. La ecuación de movimiento puede ser integrada en términos de la distancia recorrida desde el cañón al cronógrafo (y). Por lo tanto la velocidad instantánea a ser medida con el cronógrafo resulta:

$$V_y(t) = V_{0y} - \frac{k}{m}y \quad (2)$$

Donde V_{0y} es la velocidad inicial del proyectil al salir del alma del cañón. La relación lineal dada en (2) permite evaluar experimentalmente el coeficiente k y la velocidad inicial V_{0y} .

Adicionalmente pueden obtenerse los coeficientes de resistencia aerodinámica C_D de cada calibre. El formalismo usual consiste en

considerar el movimiento de una bala, de masa m , área A y velocidad v , en una porción de aire estático (sin viento). Durante el vuelo el aire se comporta como un fluido ejerciendo presión sobre el proyectil. luego la ley de Bernoulli, demanda que la presión dinámica es:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad (3)$$

Esa presión es también proporcional a la Fuerza resistiva por unidad de área; luego la aceleración resistiva verifica la relación

$$ma_R = C_D PA = C_D \rho v^2 \frac{\pi D^2}{8} \quad (4)$$

Donde C_D es el coeficiente de resistencia aerodinámica, característico de la ojiva del proyectil, y D su calibre. Si N_M denota al número de Mach, cociente entre la velocidad de la bala y el sonido, P la presión atmosférica y $\gamma=1.4$ el coeficiente de dilatación adiabática para el aire seco entonces la relación (4) puede escribirse como

$$\begin{aligned} a_R &= \frac{\pi D^2}{8 m} (\rho_s^2 N_M^2) C_D \\ &= \frac{\pi D^2}{8 m} \gamma p N_M^2 C_D \end{aligned} \quad (5)$$

Donde se ha usado la velocidad de propagación del sonido para aire seco en la última igualdad (Cucharero, 1992). Al reemplazar aquí la expresión de la aceleración del proyectil, en términos de la velocidad medida (Ecuación 2), puede evaluarse el coeficiente de resistencia aerodinámica:

$$C_D = -\frac{8 km}{\pi \gamma D^2} \frac{V_y(t)}{p N_M^2} \quad (6)$$

Resultados y discusión

Para analizar cada pulso emitido en cada panel, cuando la bala atraviesa el detector, es necesario realizar una serie de disparos y obtener un promedio de los pulsos con el osciloscopio. El osciloscopio utilizado, modelo 'DSO-QUAD v 2.7, permite conservar los datos en la memoria interna, para luego procesarlos con el software OriginPro 8.6 ©. Se procede a identificar, el valor mínimo del pulso, este valor de tensión (voltaje) indica el instante de encendido/apagado del sensor de movimiento. La diferencia de tiempo presente entre esas señales permite calcular la velocidad, teniendo en cuenta que la distancia entre los paneles es de 0,71 metros. Para ejemplificar el procedimiento obsérvese en la figura 3 una señal obtenida para un disparo típico.

En la figura 4, como ejemplo, se observa que la distancia que hay entre los dos pulsos es de $1,8734 \cdot 10^{-3}$ s, dado que los sensores están separados a una distancia 0,71 m, la velocidad de estimada resulta ser $381 \text{ m/s} \pm 11 \text{ m/s}$.

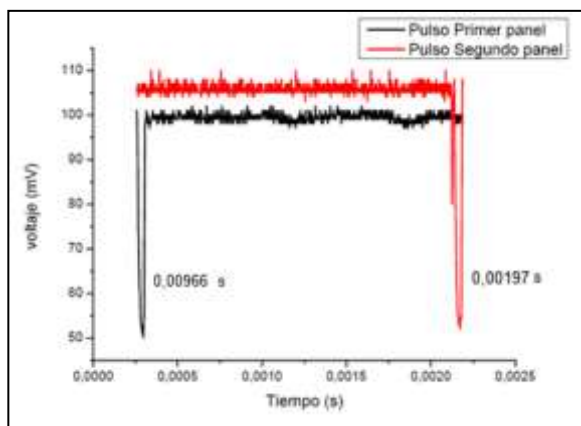


Fig. 4. Pulsos emitido por disparo Parabellum 9 mm

En la siguiente tabla se muestran los tiempos y velocidades obtenidas con el cronógrafo balístico construido y las velocidades obtenidas con el cronógrafo B741 en uso actualmente CAVIM.

Tabla 2. Características de los proyectiles usados.

Calibre 9mm Parabellum			
Número de Disparos	Distancia desde el cañón (m)	Tiempo promedio (ms) ($\pm 0,01 \text{ ms}$)	Velocidad media ($\pm 10,5 \text{ m/s}$)
3	10	1,87340	381
3	20	0,00188	379
3	30	0,00195	365
3	40	0,00201	354
3	50	0,00205	347
3	60	0,00212	336
3	70	0,00215	332
3	80	0,00219	326

Para la calibración del cronógrafo balístico se realiza la medición de las velocidades en conjunto con el que está cronógrafo B741, variando la distancia entre ambos con respecto al cañón fijo, tal como se aprecia en la tabla 2. Se realizaron 3 disparos por cada 10 metros y se calculó la velocidad, para realizar la calibración (Figura 5).

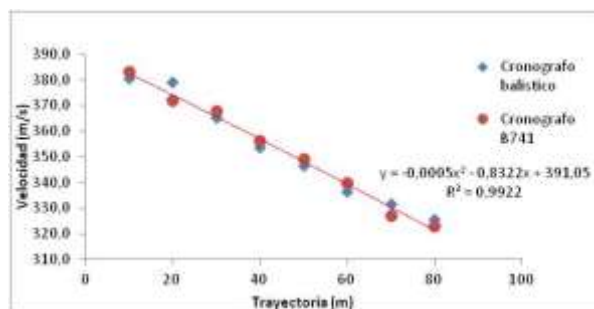


Fig. 5. Curva de calibración para munición 9mm Parabellum

Se midió con el cronógrafo, la velocidad del proyectil a diferentes distancias; para graficar la ecuación (2). Para cada calibre y para cada distancia, se repitió el disparo diez veces, cuyos resultados se grafican en la figura 6.

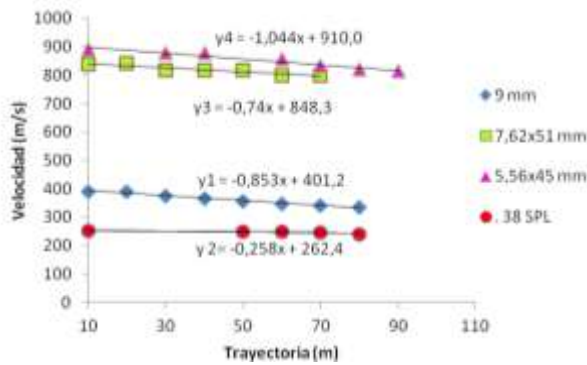


Fig. 6. Resultados de las pruebas balísticas, de velocidad trayectoria.

Luego de graficar las velocidades obtenidas con el cronógrafo balístico construido, obtuvimos la desviación estándar para calibre 9mm de ± 11 m/s. Utilizando la ecuación 6 podemos obtener el valor de C_D y podemos observar también como varía el coeficiente de resistencia aerodinámica en su trayectoria al analizar la dispersión del proyectil, estos valores se muestran en la Tabla 3.

Calibre	k (s^{-1})	Δk $\pm s^{-1}$	C_D m/ mmHg	ΔC_D ± 1 m/ mmHg
9mm	-6,82	0,03	-0,151	0,013
.38 SPL	-2,64	0,02	-0,101	0,002
7,62 mm	-7,06	0,05	-0,073	0,002
5,56 mm	-4,16	0,01	-0,041	0,002

En la tabla 3 observamos una correspondencia lineal entre el coeficiente de resistencia aerodinámica C_D y el coeficiente de dispersión k tal como se muestra en la ecuación (6). Nótese que no existe una relación lineal entre el coeficiente de resistencia aerodinámica y el calibre del proyectil. El calibre 9mm y la bala calibre .38 presentan una mayor resistencia aerodinámica resultados que permiten inferir que, bajo las mismas condiciones de velocidad inicial y ambientales estos proyectiles tendrán un menor alcance efectivo que aquellos que presentan una menor resistencia aerodinámica tal como los calibres 5,56 y 7,62. Es evidente que una sub-ametralladora UZI de fabricación

israelí que es un arma automática, presentara un menor alcance efectivo que un fusil M16.

Conclusiones

Los resultados demuestran la utilidad del cronógrafo construido con diodos de emisión infrarrojo y fotodiodos como elemento sensor mostraron su eficacia en virtud del tiempo de respuesta en el orden de los milisegundos cuando se interrumpe la señal LED, y con sensibilidad mejorada respecto a la tecnología foránea del cronógrafo B741, de fotoceldas, y ambos son mas efectivos y fáciles de operar que el método del péndulo balístico; que se utilizaba anteriormente en CAVIM. No solo por su precisión y factibilidad de implantación sino también disminuye el tiempo de evaluación de cartuchos el área de control de calidad de la empresa.

Se realizó una serie de mediciones de las velocidades lineales de proyectiles de diferentes calibres, de armas automáticas de uso individual, como: 9mm, .38 SPL, 7,62x51 mm y 5,56x45 mm. Las velocidades de los proyectiles es un parámetro de gran importancia para el control de calidad de las recargas del cartucho y está relacionado con la potencia y efectividad del producto. Para los calibres 9mm y .38 SPL en el ensayo de velocidades a 100 metros de distancia, se observó para 9mm mantiene su trayectoria disminuyendo su velocidad y para el calibre .38 SPL sucede que el proyectil no logra llegar a los 100 metros con una velocidad lineal, decayendo a los 80 metros a una altura aproximada de 20 cm del suelo; perdiendo su energía con la fricción del aire, esto se debe a la carga de pólvora del cartucho y el impulso generado por los gases de la combustión en el proceso de disparo, en este caso el proyectil comienza a describir una parábola característica con ángulo determinado igual a cero.

Es importante destacar que el coeficiente de resistencia aerodinámica es

muy diferente al coeficiente de dispersión del proyectil, ya que el de resistencia aerodinámica se refiere a la fuerza externas que sufre el proyectil al moverse a través del aire, esto se debe a la forma de la ojiva. Mientras que el coeficiente de dispersión describe la rapidez de expansión del trazado de la trayectoria, cuando se realiza un disparo. De acuerdo con los resultados obtenidos, se demuestra que a medida que aumenta el coeficiente de dispersión k , también se incrementa el coeficiente de resistencia aerodinámica.

Los cálculos realizados para los coeficientes de resistencia aerodinámica y de dispersión también constituyen un aporte en el área de balística criminal, ya que permitirá evaluar en una escena del crimen analizar e interpretar los resultados balísticos.

Agradecimientos

Se agradece el financiamiento parcial a través del proyecto estratégico FONACIT: 2011-000326.

Bibliografía

- Coupland R., Kneubuehl B., Rothschild A. & Thali M. (2011). *Wound Ballistics: Basics and Applications*. Springer. Pág. 7-10. Berlín.
- Cucharero P. (1992). *Balística Exterior*. Ministerio de Defensa y Secretaria General Técnica. Cap. 1 y 3. Madrid.
- CAVIM. (2012). *Antecedentes Históricos de CAVIM*. Fuente: Compañía Anónima Venezolana de Industrias Militares.
- Falcón N. (2008) *Dinámica de Fluidos y Fenómenos de Transporte*. 1ra Edición. Fondo Editorial Asociación de Profesores de la Universidad de Carabobo (APUC). p.p. 13-15.
- Gutiérrez, S. (2007). *Tartaglia: El Desafío de una Ecuación*. Revista Suma. 56. 89-96.
- González A. (2004). *Fundamentos de Balística*. Ministerio de la Defensa, Pág. 67-73. España.
- HIGH PRESURE INSTRUMENTATION. (2003). *B471 Precision Light Screen*. Catalogue. Austria. Disponible en: <http://www.hpi-gmbh.com/>
- Klimi, G (2014) *Exterior Ballistics : The remarkable Methods*, Xlibris: NY, USA.