

# ESTUDIO DE LOS FENÓMENOS EN UN FRENO DE BOCA DE TIPO ABIERTO

*Fecha de recepción:* 11 de junio de 2025

*Fecha de aceptación:* 11 de julio de 2025

Mathilde Gallego<sup>1</sup>  
CRL. Federico Ramírez Santa-Pau<sup>2</sup>  
Universidad Pontificia Comillas

**Resumen:** *en el presente artículo se desarrolla el estudio por métodos clásicos de los fenómenos que tienen lugar en un freno de boca de tipo abierto para cañones de artillería. El estudio se inicia con una descripción de los fenómenos de vaciado de los gases producto de la combustión del propulsante; a continuación se presentan las ecuaciones que rigen el comportamiento dinámico del freno de boca, así como los parámetros empleados para evaluar su rendimiento. Finalmente, se aborda el estudio numérico de un caso práctico. El procedimiento empleado constituye una herramienta sencilla y suficientemente precisa para efectuar la evaluación del comportamiento de frenos de boca ya existentes, así como para desarrollar las fases preliminares de diseño de nuevos modelos de frenos de boca.*

**Palabras clave:** *freno de boca, artillería, comportamiento dinámico, rendimiento.*

## STUDY OF THE PHENOMENA IN AN OPEN-TYPE MUZZLE BRAKE

**Abstract:** *the study by classical methods of the phenomena occurring in an open type muzzle brake for artillery guns is presented. The study begins with a description of the discharge phenomena of the gases produced by the combustion of the propellant; then the equations governing the dynamic behaviour of the muzzle brake are presented, as well as the parameters used to evaluate its performance. Finally, the numerical*

- 
- 1 Bachelor en Génie Mécanique. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausana, Suiza. Correo electrónico: mathilde.gallego@epfl.ch
  - 2 Ingeniero de Armamento y Material y Doctor Ingeniero de Armamento. Escuela Politécnica Superior del Ejército, Madrid, España. Licenciado de Grado (equivalente a Magister) en Ciencias Químicas, especialidad Metalurgia. Universidad Complutense, Madrid, España. Actualmente se desempeña como Profesor Asociado en la Escuela de Ingeniería (ICAI) de la Universidad Pontificia Comillas, Madrid, España. Correo electrónico: framirez@icai.comillas.edu



*study of a practical case is addressed. The procedure presented here constitutes a simple and sufficiently accurate tool for carrying out the performance evaluation of existing muzzle brakes, as well as for the preliminary design phases of new models of muzzle brakes.*

**Key words:** muzzle brake, artillery, dynamic behaviour, performance.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de este estudio es desarrollar un método sencillo y eficiente para analizar la fase de descarga de gas que se produce inmediatamente después la salida del proyectil por boca y, en este contexto, evaluar el rendimiento de un freno de boca de tipo abierto.

Los principales parámetros físicos que describen el comportamiento del gas (presión, temperatura, caudal, etc.) se calculan aplicando las teorías clásicas del flujo de gases a lo largo del proceso de vaciado. Se hace especial hincapié en la interacción entre el flujo de gas y el freno de boca, para determinar los parámetros dinámicos que caracterizan el desvío de la corriente fluida y la transferencia del impulso al freno de boca y a la masa reculante. A continuación, se describen distintos indicadores de rendimiento sencillos.

Finalmente, se aborda la aplicación del método al caso práctico de un cañón Schneider 75/22, con vistas a identificar los parámetros geométricos de diseño óptimo.

## 2. LOS PROCESOS DE DESCARGA DEL GAS

El proceso de diseño de un freno de boca se inicia determinando las variables de estado (presión y temperatura, fundamentalmente) y las variables fluidodinámicas del gas (caudal másico y cantidad de movimiento) desde el instante de salida del proyectil por boca a lo largo de la fase de vaciado.

### 2.1. Magnitudes en el instante de salida del proyectil

#### 2.1.1. Temperatura del gas

La temperatura del gas en el instante de salida del proyectil por boca se obtiene aplicando la ecuación de Résal, que establece el balance de energía en el momento de la salida del proyectil por la boca de fuego:

$$T_0 = - \frac{\gamma-1}{m_c R} \left( \frac{1}{2} m_p v_0^2 (1 + \delta) + \frac{1}{6} m_c v_0^2 \right) + T_{iso} \quad [1]$$



El parámetro  $\delta$  representa la fracción de la energía liberada por el propulsante que se transfiere en forma de calor al exterior del tubo a través de la pared de este. Aunque  $\delta$  puede calcularse con precisión, un valor aproximado suele resultar suficiente (AMCP 706150, 1965; AMCP 706251, 1968). En el caso que se resolverá más adelante se adoptará un valor de  $\delta = 1/6$ .

### 2.1.2. Distribución de presión a lo largo del tubo

El perfil de presión a lo largo del tubo en el instante de salida del proyectil por boca se puede determinar fácilmente de modo aproximado mediante la expresión:

$$p_0 = \frac{RT_0}{\frac{V}{m_c} - \eta} \left[ 1 + \frac{1}{6} \frac{m_c}{m_p} \left( 1 - 3 \frac{A^2 x^2}{V^2} \right) \right] \quad [2]$$

No obstante, y dado que en el presente estudio solo son de interés la presión en boca y la presión en el cierre en el momento de salida del proyectil, y que va a emplearse un código de balística interior para obtener datos previos, la presión en boca se determinará con el código de balística interior y la segunda se calculará a partir de aquella, aplicando el desarrollo en serie de potencias citado por Corner (1950):

$$p_{c,0} = p_{b,0} \left[ 1 + \frac{m_c}{2m_p} - \frac{1}{24\gamma} \left( \frac{m_c}{m_p} \right)^2 + \left( \frac{1}{80\gamma} + \frac{1}{360\gamma^2} \right) \left( \frac{m_c}{m_p} \right)^3 + \dots \right] \quad [3]$$

### 2.1.3. Caudal másico inicial de gas

El caudal másico de gas viene descrito por la ley de Hugoniot, en la que se pueden despreciar los términos de orden superior sin merma apreciable de precisión. En el momento de salida del proyectil se tiene:

$$Q_0 = \frac{m_c A}{V} \left( 1 + \frac{1}{6} \frac{m_c}{\gamma m_p} \right) \sqrt{\gamma R T_0 \left( 1 + \frac{1}{6} \frac{(\gamma-1)m_c}{\gamma m_p} \right) \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad [4]$$

## 2.2. Variación de las magnitudes tras la salida del proyectil

Una vez que el proyectil sale por el plano de boca, comienza la fase de vaciado del tubo, que puede ser tratada con la teoría de Hugoniot-Rateau, en la que se introducen correcciones por el covolumen del gas y el perfil de velocidad del gas a lo largo del tubo.

### 2.2.1. Caudal másico de gas

El caudal másico de gas  $Q_t$  en un instante  $t$  posterior a la salida del proyectil por boca viene dado por:



$$Q_t = Q_0 \left(1 + \frac{t}{\theta}\right)^{\frac{1+\gamma}{1-\gamma}} \quad [5]$$

donde  $\theta$  es el tiempo característico, parámetro que describe con precisión la duración del proceso de flujo del gas tras la salida del proyectil por boca, dado por:

$$\theta = \frac{2V}{A(\gamma-1)} \sqrt{\frac{\left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}}{\gamma R T_0 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{(\gamma-1)m_c}{\gamma m_p}\right)}} \quad [6]$$

### 2.2.2. Variables de estado del gas

Conocidos los valores de  $Q_0$  y  $Q_t$ , la temperatura, la presión y la densidad del gas vienen dadas por las expresiones:

$$T_t = T_0 \left(\frac{Q_t}{Q_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad [7]$$

$$p_{b,t} = p_{b,0} \left(\frac{Q_t}{Q_0}\right)^{\gamma} \quad [8]$$

$$\rho_t = \frac{1}{\frac{RT_t}{p_{b,t}} + \eta} \quad [9]$$

### 2.2.3. Variables fluidodinámicas del gas

La velocidad y el número de Mach del gas vienen dadas por:

$$v_t = \frac{Q_t}{\rho_t A} \quad [10]$$

$$Ma_t = \frac{v_t}{\sqrt{\gamma R T_0}} \quad [11]$$

### 2.2.4. Cantidad de movimiento

La derivada con respecto al tiempo de la cantidad de movimiento del gas viene dada por:

$$\dot{P}_g = \frac{A\gamma R T_0 m_c}{V} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{m_c}{m_p}\right) \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \left(1 + \frac{t}{\theta}\right)^{\frac{2\gamma}{1-\gamma}} \quad [12]$$

que integrada para un tiempo  $t$  cualquiera da la cantidad de movimiento del gas en función del tiempo:



$$P_g = m_c \sqrt{RT_0} \left( 1 + \frac{m_c(\gamma+1)}{\gamma m_p} \right) \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{3}{2}} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{t}{\theta} \right)^{\frac{1+\gamma}{1-\gamma}} \right] \quad [13]$$

Haciendo  $t = \infty$  en la expresión [13] se obtiene el valor máximo de la cantidad de movimiento del gas:

$$P_{g,max} = m_c \sqrt{RT_0} \left( 1 + \frac{m_c(\gamma+1)}{\gamma m_p} \right) \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{3}{2}} \quad [14]$$

### 3. COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL FRENO DE BOCA

El principio de funcionamiento de los frenos de boca se basa en la expansión del gas entre el plano de boca y el deflector o deflectores, que a su vez desvían la trayectoria del gas hacia los flancos y la retaguardia del tubo.

En los frenos de boca de tipo cerrado el movimiento del gas queda restringido por la propia configuración geométrica del freno, mientras que en los de tipo abierto es la envolvente de la onda de choque la que efectúa el confinamiento del flujo de gas, por lo que no se requiere la presencia de una estructura física adicional al deflector. En la figura N° 1, adaptada del documento AMCP 706251 (1968), se muestra un esquema simplificado de un freno de boca de tipo abierto, en el que se indican los parámetros dimensionales de interés.

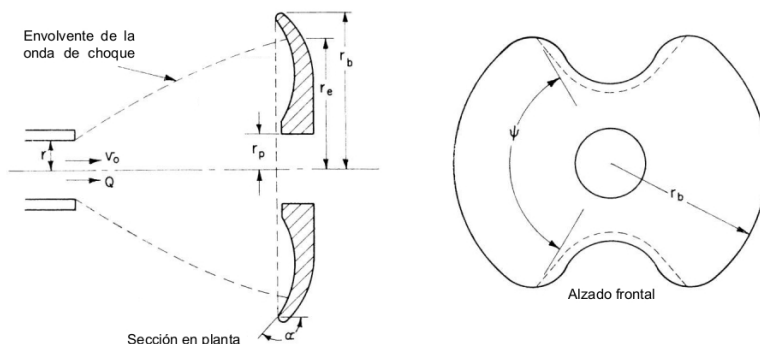


Figura N° 1: Parámetros dimensionales de un freno de boca de tipo abierto.

Fuente: Elaboración propia.

#### 3.1. Fuerza sobre el freno de boca

Si el radio de la envolvente de la onda de choque en el plano del deflector es igual o menor que el del propio deflector, una fracción significativa del flujo de gas es desviada por el freno de boca. Esta fracción viene dada por:



$$f = 1 - \left( \frac{r_p}{r_e} \right)^2 ; r_e \leq r_d \quad [15]$$

Si el radio de la envolvente de la onda de choque en el plano del deflector es mayor que el del deflector, la fracción del flujo de gas desviada por el freno de boca viene expresada por:

$$f = 1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\psi}{\pi} \frac{r_d^2 - r_p^2}{r_e^2} ; r_e > r_d \quad [16]$$

La fuerza ejercida por el flujo de gas sobre el deflector viene dada por la expresión (Schlenker, 1962):

$$F_f = Q \sqrt{\gamma R T_0} n f \frac{1 - \cos(\alpha)}{f_3} \quad [17]$$

en la que el factor de aceleración  $n$  depende del índice adiabático del gas,  $\gamma$ , y de la divergencia,  $\Delta$ , según la expresión implícita:

$$n^{\gamma+1} - \frac{2}{\gamma-1} n^{\gamma-1} (\gamma+1)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} + \frac{2}{(\gamma-1)\Delta^{\gamma-1}} \left( \frac{2}{(\gamma+1)^{\frac{1}{\gamma}}} \right)^{\frac{\gamma+1}{2}} = 0 \quad [18]$$

A su vez, la expresión de la divergencia es:

$$\Delta = 1 + \frac{\psi}{\pi} \left( \frac{r_e}{r} \right)^2 \quad [19]$$

Según aumenta  $\Delta$ ,  $n$  aumenta asintóticamente hasta un valor constante, como se observa en la figura N° 2, obtenida para un valor de  $\gamma = 1,2441$ , correspondiente al propulsante del caso práctico que se expondrá en el apartado 5 del presente estudio.

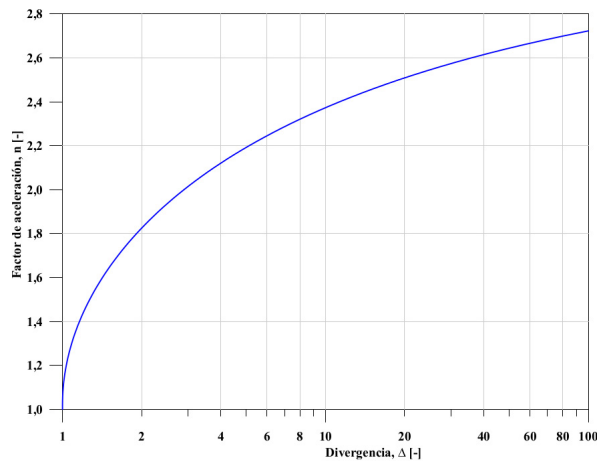


Figura N° 2: Factor de aceleración en función de la divergencia.

Fuente: Elaboración propia.



La constante  $f_3$  que figura en la ecuación 17 es un factor de corrección que se determina empíricamente (AMCP 706251, 1968; Downing, 2002). Su valor típico es 1,33.

### 3.2. Impulso sobre el cañón e impulso de retroceso

El gas que es desviado por el deflector genera un impulso sobre el cañón que viene dado en función del tiempo por:

$$I = m_c \sqrt{\frac{RT_0}{\gamma}} \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\beta-\gamma}{2(\gamma-1)}} \left[ 1 - \left( \frac{\gamma(\gamma-1)}{2} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \frac{Ap_{c,0}}{m_c \sqrt{\gamma RT}} t + 1 \right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \right] \quad [20]$$

Haciendo  $t = \infty$  en la expresión [20] se obtiene el valor máximo del impulso:

$$I_{max} = m_c \sqrt{\frac{RT_0}{\gamma}} \left( \frac{\gamma+1}{2} \right)^{\frac{\beta-\gamma}{2(\gamma-1)}} \quad [21]$$

El impulso de retroceso total comunicado a la masa reculante se puede obtener a partir del máximo impulso sobre el cañón, mediante la expresión:

$$I_r = I (1 - B) \quad [22]$$

en la que el parámetro  $B$  es el índice de cantidad de movimiento, que Schlenker (1962) define como la razón entre la componente axial de la fuerza ejercida sobre el freno y la fuerza ejercida sobre el cierre. La variación de  $B$  con el tiempo se recoge en la figura N° 3, adaptada de Schlenker (1962), y normalmente se determina de modo experimental, ya que su cálculo analítico no es sencillo. Por otra parte, y dado que  $B$  se emplea para obtener un valor total, más que su valor instantáneo es de interés su valor efectivo promedio que, obtenido por integración gráfica, se muestra igualmente en la figura N° 3 con línea de trazos. Dicho valor promedio es  $B_{ef} = 0,97$ .

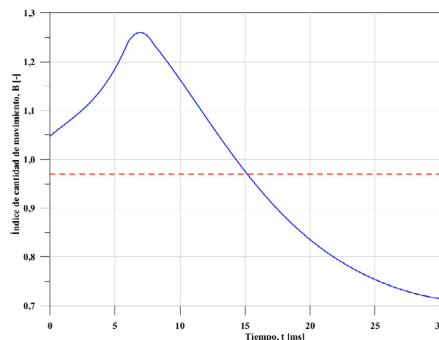


Figura N° 3: Índice de cantidad de movimiento con el tiempo.

Fuente: Elaboración propia.



### 3.3. Energía de retroceso

La energía transferida a la masa reculante en ausencia de freno de boca viene dada por:

$$E_r = \frac{1}{2} m_r v_r \quad [23]$$

donde  $v_r$ , es la velocidad de retroceso libre de la masa reculante, que viene dada por:

$$v_r = \frac{P_r}{m_r} \quad [24]$$

donde  $P_r$  es la cantidad de movimiento de la masa reculante sin freno de boca, que a su vez viene dada en función del impulso sobre el cañón, la velocidad en boca y la masa efectiva del conjunto proyectil-carga de proyección,  $m_e$ , por:

$$P_r = m_e v_0 + I \quad [25]$$

siendo  $m_e$ :

$$m_e = m_p + \frac{1}{2} m_c \quad [26]$$

Análogamente, en presencia de freno de boca se pueden derivar expresiones similares a las de las ecuaciones 23 y 24; en este caso, no obstante, la cantidad de movimiento de la masa reculante con freno de boca  $P_{r,f}$  está relacionada con el impulso de retroceso, y no con el impulso sobre el cañón:

$$P_{r,f} = m_e v_0 + I_r \quad [27]$$

### 3.4. Efectos de la presencia de freno de boca

Una vez determinados los intercambios energéticos con y sin freno de boca, el ingeniero proyectista se enfrenta a dos situaciones extremas: en la primera de ellas se mantiene la longitud de retroceso constante, con un valor igual al que se tenía sin freno de boca, lo que supondrá una disminución de la fuerza de retroceso; en la segunda, se mantiene la fuerza de retroceso constante, y la longitud de retroceso disminuirá. En el primer caso, la fuerza de retroceso viene dada por:

$$F_a = \frac{E_{r,f}}{L} \quad [28]$$

Mientras que, en el segundo caso, la longitud de retroceso será:



$$L = \frac{E_{r,f}}{F_a} \quad [29]$$

## 4. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL FRENO DE BOCA

El comportamiento de un freno de boca se puede caracterizar desde diferentes puntos de vista, aunque en todos los casos, el criterio empleado se basa en comparar una cierta magnitud en presencia de freno de boca con la misma magnitud en ausencia de aquel. En este apartado se expondrán tres de los criterios más comúnmente empleados, según la clasificación de Von Boutteville (1982), aunque otros autores definen parámetros similares con ligeras variaciones (Corner, 1950; Longdon, 1984). Es de destacar que los valores numéricos de estos parámetros pueden diferir considerablemente entre sí.

### 4.1. Rendimiento energético

El rendimiento energético es la razón entre la variación de la energía de retroceso en ausencia y en presencia de freno de boca y la energía de retroceso en ausencia de freno de boca:

$$\varepsilon = \frac{E_r - E_{r,f}}{E_r} \quad [30]$$

El rendimiento energético es de especial importancia en el diseño de montajes, ya que establece la reducción de la energía de retroceso que deberá absorber el montaje. Su valor suele estar comprendido entre 0,3 y 0,5.

### 4.2. Rendimiento de retroceso

El rendimiento de retroceso o rendimiento propulsivo es la razón entre la variación de la cantidad de movimiento de la masa reculante en ausencia y en presencia de freno de boca y la cantidad de movimiento de la masa reculante en ausencia de freno de boca:

$$\lambda = \frac{P_r - P_{r,f}}{P_r} \quad [31]$$

El rendimiento de retroceso es el parámetro más sencillo de determinar, ya que puede ser medido experimentalmente.

### 4.3. Rendimiento fluidodinámico

El rendimiento fluidodinámico es la razón entre la variación de la cantidad de movimiento del gas en ausencia y en presencia de freno de boca y la cantidad de movimiento del gas en ausencia de freno de boca:



$$\sigma = \frac{P_g - P_{g,f}}{P_g} \quad [32]$$

El rendimiento fluidodinámico solo depende de las características del flujo de gas, y estas dependen en último extremo de la forma y dimensiones del freno de boca; por esta razón, el rendimiento fluidodinámico constituye una característica propia y distintiva del freno de boca, independiente del tubo y de la munición empleada. De aquí que a veces se le conozca como rendimiento intrínseco.

## 5. CASO PRÁCTICO: APLICACIÓN AL CAÑÓN SCHNEIDER 75/22

En el presente apartado se llevará a cabo la aplicación práctica de la teoría presentada anteriormente.

Como se observa en la figura N° 1, existen múltiples parámetros geométricos y dimensionales cuya modificación afecta al rendimiento del freno de boca; no obstante, la práctica común ha determinado los valores más satisfactorios de algunos de estos parámetros (por ejemplo, la distancia del plano de boca al deflector o el diámetro de paso libre del proyectil), valores que se mantendrán sin modificar en este trabajo.

El presente estudio ha comprendido finalmente el cálculo paramétrico del impulso de la fuerza transferida al freno de boca tomando como variables independientes el ángulo de apertura del freno de boca ( $\psi$ ) y el ángulo de deflexión del deflector ( $\alpha$ ). Ambas influyen significativamente en el impulso global de frenado.

### 5.1. Especificaciones del cañón y del freno de boca

El cañón Schneider 75/22 fue seleccionado como caso de estudio debido a que se dispone de gran cantidad de datos relativos a la balística interior de esta pieza; adicionalmente, los valores de velocidad inicial, masa del proyectil y masa del propulsante se consideran especialmente equilibrados entre sí, pues se ajustan con un error inferior al 1,5 % a la correlación empírica debida a Ogorkiewicz (Kathe, 2001). Los parámetros de interés de la pieza son los siguientes:

$$r = 38,25 \text{ mm} \quad A = 454,3 \text{ cm}^2 \quad V = 7,324 \text{ dm}^3 \quad L = 0,85 \text{ m} \quad m_r = 340 \text{ kg}$$

La masa del freno de boca puede estimarse, por analogía con otras piezas semejantes, en un 10 % de la masa del tubo. En el presente estudio se considerará un valor de 35 kg, con lo que el peso total de la masa reculante será  $m_{r,f} = 375 \text{ kg}$ .



La selección de los parámetros geométricos del freno de boca se llevó a cabo considerando los valores comúnmente adoptados en la bibliografía sobre diseño de frenos de boca. Así, para el diámetro de paso libre del proyectil por el freno se empleó el valor de 1,125 veces el del calibre del tubo, preconizado por diversos autores (Smith, 1968; Longdon, 1984; Schmidt, 2001); se obtiene así un radio de paso libre  $r_p = 43,0$  mm.

En cuanto a la distancia entre el plano de boca y el deflector del freno ( $d_d$ ), las fuentes bibliográficas (Schlenker, 1962; Salsbury, 1966; Smith, 1968; Longdon, 1984) indican un intervalo típico de entre 1,3 y 2,2 veces el calibre; en el presente estudio se eligió un valor de 1,5 para equilibrar compacidad y eficacia del freno, lo que da un valor para  $d_d = 114,8$  mm. El valor del radio de la envolvente de la onda de choque en boca a la distancia  $d_d$  se determinó empleando la correlación gráfica mostrada en la figura N° 4, adaptada de Fansler (1981), que proporciona un valor de  $r_e = 158,5$  mm.

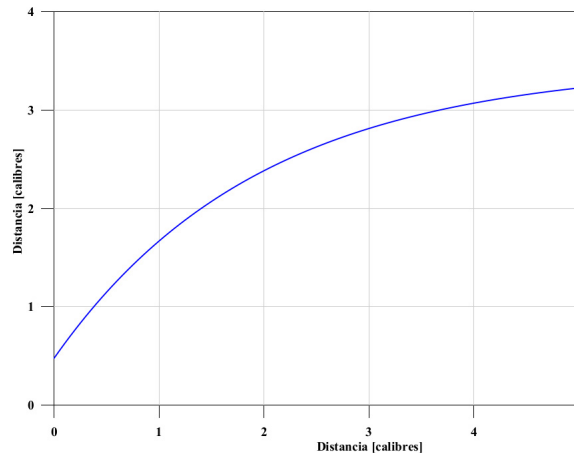


Figura N° 4: Perfil de la envolvente de la onda de choque.

Fuente: Elaboración propia.

Análogamente, el intervalo típico para el radio del deflector,  $r_d$ , suele encontrarse entre 1,25 y 3 veces el calibre del tubo (Salsbury, 1966; AMCP 706251, 1968; Smith, 1968; Longdon, 1984); en el presente estudio se escogió un valor de 2,5 veces el calibre, es decir,  $r_d = 191,3$  mm. Con ello se garantiza que, en función de los valores de otros parámetros, el deflector desvía no menos de un 90 % del caudal de gas, lo que permite conseguir un rendimiento excelente con un freno de boca de peso no excesivo.

## 5.2. Características del propulsante

El cañón Schneider 75/22 emplea una pólvora tubular de doble base sin disolvente. Sus parámetros balísticos se obtuvieron a partir de la composición química mediante el



método de Hirschfelder-Sherman desarrollado en el documento AMCP 706251 (1960). A los efectos del presente estudio son relevantes los valores siguientes:

$$\eta = 1,03 \text{ dm}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \quad \gamma = 1,2441 \quad T_{iso} = 2894 \text{ K} \quad R = 358,43 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

### 5.3. Modelo de balística interior

Para obtener los valores en el plano de boca de las magnitudes de interés para el cálculo del freno de boca se ejecutó un código de balística interior de parámetros globales, para la carga N° 4 (la de mayor peso de pólvora utilizada con el cañón Schneider 75/22,  $m_c = 0,54 \text{ kg}$ ) y proyectil de alto explosivo Mod. 38 con  $m_p = 6,6 \text{ kg}$ . Se obtuvo un valor de la velocidad inicial del proyectil  $v_o = 479,9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (el valor nominal es  $480 \pm 4,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) y un valor de la presión en boca  $p_{b,o} = 53,56 \text{ MPa}$ .

La temperatura promedio del gas y la presión en el cierre en el momento de la salida del proyectil por boca se obtienen a partir de la ecuación [1] y de la ecuación [3], respectivamente:  $T_o = 1751 \text{ K}$ ;  $p_{c,o} = 55,74 \text{ MPa}$ . El caudal másico de gas en el momento de la salida del proyectil por boca viene dado por la ecuación [4]:  $Q_o = 176,46 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 5.4. Variación de las magnitudes tras la salida del proyectil

El tiempo característico  $\theta$ , calculado mediante la ecuación [6], proporciona un valor  $\theta = 25,35 \text{ ms}$ , lo que permite acotar la extensión del eje temporal en las gráficas que siguen, en las que se representa la variación con el tiempo de la temperatura, presión y densidad del gas, dadas por las ecuaciones [7], [8] y [9], respectivamente (figura N° 5); del número de Mach, dado por la ecuación [11] (figura N° 6) y del caudal másico de gas, dado por la ecuación [5] (figura N° 7).

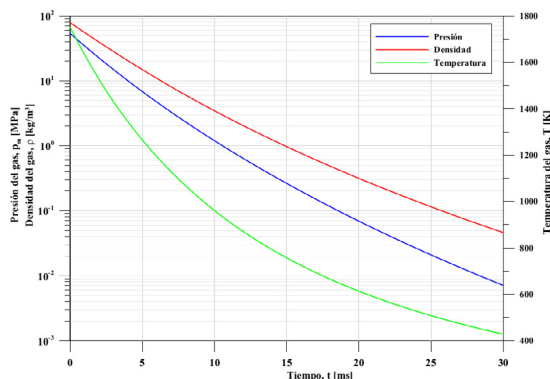


Figura N° 5: Variables de estado del gas en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia.



## Estudio de los fenómenos en un freno de boca de tipo abierto

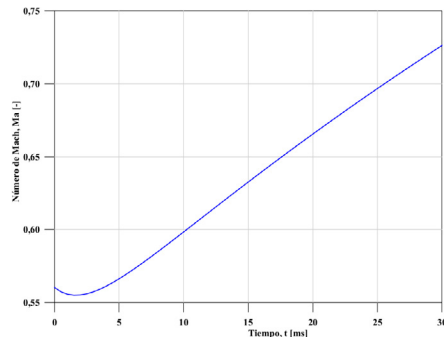


Figura N° 6: Número de Mach en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

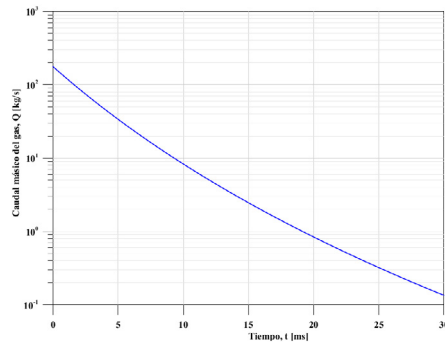


Figura N° 7: Caudal másico de gas en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones [13] y [12] proporcionan, respectivamente, los valores de la cantidad de movimiento del gas y su derivada con respecto al tiempo, que se representan en la figura N° 8. El valor máximo de la cantidad de movimiento del gas, dado por la ecuación [14] es:  $P_{g,max} = 413,01 \text{ N}\cdot\text{s}$ , y está representado con una línea de trazos en dicha figura.

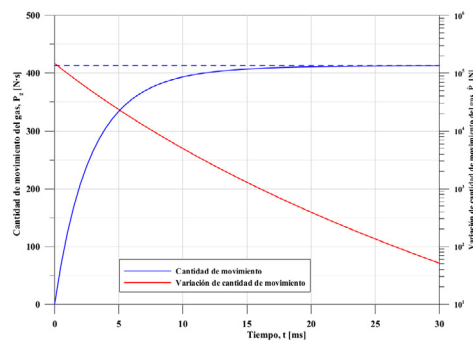


Figura N° 8: Cantidad de movimiento del gas y su derivada con respecto al tiempo.

Fuente: Elaboración propia.



El impulso sobre el cañón en función del tiempo viene dado por la ecuación [20], representada en la figura N° 9. Su valor máximo, dado por la ecuación [21] es:  $I_{max} = 746,10 \text{ N}\cdot\text{s}$ , y está representado con una línea de trazos en dicha figura.

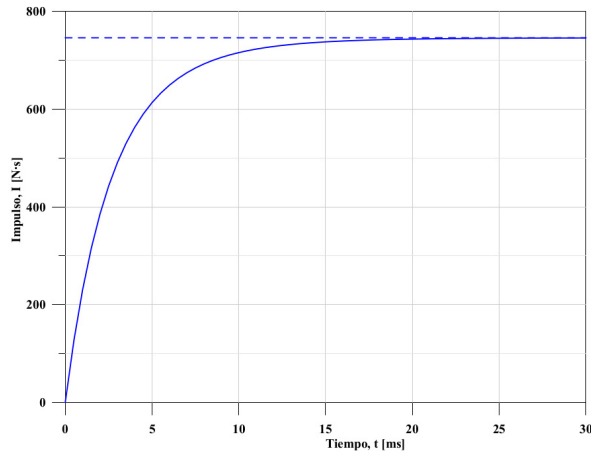


Figura N° 9: Impulso sobre el cañón en función del tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.5. Evaluación de los efectos de la variación de parámetros dimensionales

Para caracterizar los efectos de la variación de los parámetros dimensionales que definen la geometría del freno de boca, se empleó como indicador el impulso de la fuerza ejercida sobre el freno de boca a lo largo del proceso de vaciado, dado por la expresión:

$$\beta = \int F_f dt \quad [33]$$

donde la fuerza sobre el freno de boca viene expresada por la ecuación [17].

Se llevó a cabo el cálculo de  $\beta$  para valores del ángulo de apertura del freno de boca ( $\psi$ ) comprendidos entre  $45^\circ$  y  $135^\circ$ , y para valores del ángulo de deflexión del deflector ( $\alpha$ ) comprendidos entre  $90^\circ$  y  $165^\circ$ . Estos intervalos fueron elegidos de acuerdo con las restricciones impuestas por la geometría del freno y sus límites de diseño, y son consistentes con los indicados por otros autores (Schmidt, 1973; Fansler, 1981).

En la figura N° 10 se muestra la dependencia entre el impulso de frenado y los valores de los parámetros angulares del freno de boca.

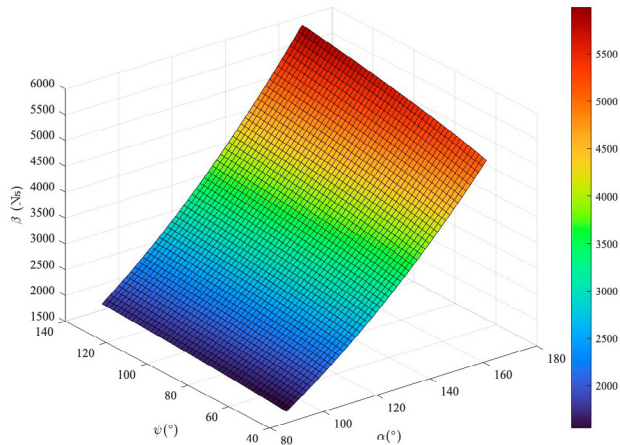


Figura N° 10: Impulso de frenado en función de los parámetros angulares del freno de boca.

Fuente: Elaboración propia.

## 5.6. Rendimientos

Los valores de los rendimientos energético, de retroceso y fluidodinámico, obtenidos con las ecuaciones [30], [31] y [32] son, respectivamente,  $\varepsilon = 0,389$ ,  $\lambda = 0,179$  y  $\sigma = 0,827$ , coherentes con los valores esperados. Obsérvese la considerable diferencia que presentan entre sí.

## 6. CONCLUSIONES

El método presentado constituye un procedimiento sencillo para estudiar los procesos fluidodinámicos que tienen lugar en la fase de vaciado de un cañón de artillería. Sin las complicaciones de modelos CFD, se considera suficiente para obtener datos para el diseño preliminar de nuevos frenos de boca o para la evaluación de frenos de boca ya existentes.

Al objeto de no complicar excesivamente el estudio, se han mantenido invariables dos parámetros dimensionales que son de interés en el diseño de los frenos de boca. Tales son la distancia  $d_d$  entre el plano de boca y el deflector, y el radio del deflector  $r_d$ . En el primer caso, la práctica totalidad de las fuentes bibliográficas coinciden en valores muy ajustados, y no tendría sentido introducir modificaciones que no conducirían a resultados aceptables. En el segundo caso, se ha escogido un valor claramente alto para el radio del deflector, lo que deja abierta la posibilidad de un estudio posterior en el que se disminuya este valor, aun a costa de que el caudal de gas desviado disminuya apreciablemente.



Asimismo, se debe hacer constar que en el presente estudio no se han considerado diversos factores que pudieran constituir limitaciones de diseño o conducir a situaciones no óptimas o simplemente inadmisibles. Tal es el caso de los niveles de ruido y las ondas de sobrepresión que aparecen a retaguardia de la pieza y que pueden afectar a los sirvientes, en particular con valores altos del ángulo de deflexión del deflector.

## NOMENCLATURA

LETRAS LATINAS		
SÍMBOLO	MAGNITUD	UNIDADES
<i>A</i>	Sección recta del ánima	<i>m</i> <sup>2</sup>
<i>B</i>	Índice de cantidad de movimiento	–
<i>Bef</i>	Valor efectivo del índice de cantidad de movimiento	–
<i>dd</i>	Distancia entre el plano de boca y el deflector	<i>M</i>
<i>Er</i>	Energía de retroceso	<i>J</i>
<i>Fa</i>	Fuerza de retroceso	<i>N</i>
<i>Ff</i>	Fuerza ejercida sobre el freno de boca	<i>N</i>
<i>F</i>	Fracción de gas desviada	–
<i>fβ</i>	Factor de corrección en ecuación [17] (1,33)	–
<i>I</i>	Impulso transmitido al cañón	<i>N·s</i>
<i>Ir</i>	Impulso de retroceso	<i>N·s</i>
<i>L</i>	Longitud de retroceso	<i>M</i>
<i>Ma</i>	Número de Mach	–
<i>mc</i>	Masa de la carga de propulsante	<i>kg</i>
<i>me</i>	Masa equivalente	<i>kg</i>
<i>mp</i>	Masa del proyectil	<i>kg</i>
<i>mr</i>	Masa reculante	<i>kg</i>
<i>n</i>	Factor de aceleración	–
<i>Pg</i>	Cantidad de movimiento del gas	<i>kg·m·s<sup>-1</sup></i>
<i>Pr</i>	Cantidad de movimiento de la masa reculante	<i>kg·m·s<sup>-1</sup></i>
<i>Pp</i>	Cantidad de movimiento del proyectil	<i>kg·m·s<sup>-1</sup></i>
<i>pb</i>	Presión en el plano de boca	<i>Pa</i>
<i>pc</i>	Presión en el plano de cierre	<i>Pa</i>
<i>Q</i>	Caudal másico de gas	<i>kg·s<sup>-1</sup></i>
<i>R</i>	Radio del ánima	<i>M</i>
<i>rb</i>	Radio del deflector	<i>M</i>
<i>re</i>	Radio de la envolvente de la onda de choque en el deflector	<i>M</i>
<i>rp</i>	Radio de paso libre del proyectil en el freno de boca	<i>M</i>
<i>R</i>	Constante específica del gas	<i>J·kg<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup></i>
<i>T</i>	Temperatura del gas	<i>K</i>
<i>Tiso</i>	Temperatura isocórica del gas	<i>K</i>



LETRAS LATINAS		
SÍMBOLO	MAGNITUD	UNIDADES
$t$	Tiempo	$s$
$v$	Velocidad del gas	$m \cdot s^{-1}$
$vr$	Velocidad de retroceso libre de la masa reculante	$m \cdot s^{-1}$
$x$	Distancia al plano de cierre	$m$

LETRAS GRIEGAS		
SÍMBOLO	MAGNITUD	UNIDADES
$\alpha$	Ángulo de deflexión del freno de boca	$^{\circ}, rad$
$\beta$	Impulso de retroceso	$N \cdot s$
$\gamma$	Índice adiabático del gas	–
$\delta$	Fracción de energía perdida en forma de calor	–
$\Delta$	Divergencia	–
$\varepsilon$	Rendimiento energético del freno de boca	–
$\eta$	Covolumen del gas	$m^3 \cdot kg^{-1}$
$\theta$	Tiempo característico	$S$
$\lambda$	Rendimiento de retroceso del freno de boca	–
$\psi$	Divergencia angular del freno de boca	$^{\circ}, rad$
$\sigma$	Rendimiento fluidodinámico del freno de boca	–

SUBÍNDICES		
SÍMBOLO	SIGNIFICADO	
$o$	Valor en el instante de salida del proyectil	
$t$	Valor en un instante $t$ posterior a la salida del proyectil	
$f$	Del freno de boca	
$max$	Valor máximo	

## REFERENCIAS

Boutteville, S. von (1982). Gun mechanics. En Germershausen, R. (ed.) *Handbook on weaponry*, 2ª ed. Rheinmetall GmbH. Düsseldorf, República Federal Alemana.

Corner, J. (1950). *Theory of the interior ballistics of guns*. Nueva York, EE.UU.: Wiley.

Downing, D.J. (2002). *Development of a novel active muzzle brake for an artillery weapon system*. Tesis de Maestría. Potchefstroomse Universiteit vir Christelike Hoër



- Onderwys (Universidad Cristiana de Educación Superior de Potchefstroom). Potchefstroom, Sudáfrica.
- Fansler, K.S. (1981). *A simple method for predicting muzzle brake effectiveness and baffle-surface pressure*. Technical Report ARBRLTR02335. US Army Ballistic Research Laboratory. Aberdeen, Maryland, EE.UU.
- Kathe, E. (2001). *Recoil reduction using propellant gas*. 10<sup>th</sup> US Army Gun Dynamics Symposium. Austin, Texas, EE.UU.
- Longdon, L.W. (ed.) (1984). *Textbook of ballistics and gunnery*. Londres, Reino Unido: H.M. Stationery Office.
- Salsbury, M.J. (1966). *The effects of a muzzle brake's diameter and length on overpressure and efficiency*. Technical Report 562920. Rock Island Arsenal. Rock Island, Illinois, EE.UU.
- Schlenker, G. (1966). *Contribution to the analysis of muzzle brake design*. Technical Report 621794. Rock Island Arsenal. Rock Island, Illinois, EE.UU.
- Schmidt, E. (1973). *Muzzle devices, a state-of-the-art survey*. Volume I: hardware study. Memorandum Report BRLMR2276. US Army Ballistic Research Laboratory. Aberdeen, Maryland, EE.UU.
- Schmidt, E. (2001). *Measurements of muzzle brake effectiveness*. 19<sup>th</sup> International Symposium of Ballistics. Interlaken, Suiza.
- Smith, F. (1968). *Muzzle brake model studies*. *Gun Blast and Muzzle Brake Symposium*. Fort Halstead, Reino Unido.
- United States Army Materiel Command (1960). *Engineering Design Handbook. Explosives Series. Solid propellants*. AMCP 706175.
- United States Army Materiel Command (1965). *Engineering Design Handbook. Ballistics Series. Interior ballistics of guns*. AMCP 706150.
- United States Army Materiel Command (1968). *Engineering Design Handbook. Guns Series. Muzzle devices*. AMCP 706251.